

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

الترتيب:
الرقم التسلسلي:

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



رسالة

لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم

شعبة: فيزياء

إختصاص: المادة والاشعاع

من إعداد الطالبة: بلة زكية

الموضوع

نمذجة لخصائص كهربائية، موضعية وزمنية، لبلازما
الأرغون والحساب العددي لمسبار لانجمير داخل جهاز
رش مهبطي مغنطروني مغدى بنظام RF

نوقشت يوم:

2020 / 06 / 10

من طرف لجنة المناقشة:

رئيسا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	عيادي كمال الدين
ممتحنا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة غرداية)	داودي باحمد
ممتحنا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة الوادي)	بن حوة بوبكر
ممتحنا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة بسكرة)	عطاف عبد الله
ممتحنا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	بابا حني أم الخير
مقررا	أستاذ تعليم عالٍ (جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	خلفاوي فتحي

2020 / 2019

تشكرات

بداية أشكر الله سبحانه وتعالى على توفيقني في إنجاز هذا البحث الذي تم في مخبر الإشعاع والبلازما وفيزياء السطوح.

و أنه لمن دواعي الإعتراف أن أتقدم بشكري الخالص إلى كل من ساعدني و أخص بالذكر: الأستاذ الدكتور **فتحي خلفاوي** أستاذ التعليم العالٍ بجامعة ورقلة الذي شرفني بإشرافه على رسالة دكتوراه والذي لن تكفي حروف هذه الرسالة لإيفائه حقه بصبره الكبير ولتوجيهاته العلمية التي لا تقدر بثمن، والتي ساهمت بشكل كبير في إتمام وإستكمال هذا العمل.

الأستاذ رئيس لجنة المناقشة أ. د. **عيادي كمال الدين** أستاذ التعليم العالٍ بجامعة ورقلة الذي شرفني بقبول ترؤسه لجنة المناقشة.

الأستاذ المناقش أ. د. **عطاف عبد الله** التعليم العالٍ بجامعة بسكرة، والأستاذ المناقش أ. د. **بن حوة بوبكر** أستاذ التعليم العالٍ بجامعة الوادي و الأستاذ المناقش أ. د. **داودي باحمد** أستاذ التعليم العالٍ بجامعة غرداية والأستاذة المناقشة أ. د. **بابا حني أم الخير** أستاذة التعليم العالٍ بجامعة ورقلة الذين أسعدوني بقبولهم مناقشة هذه الرسالة.

كما أشكر الأستاذ الدكتور. **مفتاح محمد الطيب** على مساعداته وتشجيعاته الدائمة لي. وكذا معلمي **بن نونة بخاري**.

كما أشكر زملاء: **عبابسة، لمقدم، الداوي، بن ساسي، بن عدي، عبيد، قبايلي** وجميع الأساتذة. وكذا الطلبة: **قويدري زينب، قبي سارة و منصور سعيد**.

و أهدي ثمرة جهودي إلى والدي الكريمين و إخوتي و أخواتي وكل الأقارب و الأصدقاء. و أسأل الله عز وجل أن يبارك لي فيه.

الفهرس

i	الفهرس
iii	قائمة الجداول
iv	قائمة الأشكال
1	المقدمة العامة

الفصل الأول: عموميات حول البلازما و الرش المهبطي

5	1.1.1. عموميات حول البلازما
5	1.1.1.1. تعريف البلازما
5	2.1.1. ظاهرة و درجة التأين
6	3.1.1. الخصائص الكهربائية للبلازما
10	2.1. الرش المهبطي
10	1.2.1. طرق توضع الطبقات الرقيقة
11	2.2.1. مبدأ الرش المهبطي
12	3.2.1. مردود الرش
12	4.2.1. أنواع الرش المهبطي
14	5.2.1. الرش المهبطي المغنطروني

الفصل الثاني: تشخيص ونمذجة بلازما التفريغ الكهربائي

19	1.1. تشخيص بلازما
19	1.1.1. تقنية التشخيص الضوئي
19	2.1.1. مطياف الكتلة
19	3.1.1. مسبار كهربائي ساكن
20	4.1.1. أساسيات مسبار لانجمير
20	1.4.1.1. مبدأ عمل مسبار لانجمير
21	2.4.1.1. أقسام و أنواع مسبار لانجمير

21	.....3.4.1.II نظام تشغيل مسبار لانجمير
24	.....4. 4.1.II فرضيات النظرية الكلاسيكية للانجمير
25	.....5.4.1.II تحديد الخصائص الكهربائية للبلازما
27	.....2.II نمذجة بلازما
27	.....1.2.II النموذج الموائع
28	.....2.2.II نموذج المجهرى
29	.....3.2.II النموذج الهجين
30	.....5.2.II أساسيات نموذج الموائع
30	.....1.5.2.II تقريبات نموذج الموائع
31	.....2.5.2.II معاملات الانتقال في وجود الحقل المغناطيسي

الفصل الثالث: تطبيق نموذج الموائع على بلازما مغناطيسية لنظام RF 13.56 MHz

37	.....1.III المقدمة
37	.....2.III النموذج الرياضي
38	.....3.III تطبيق نموذج الموائع على بلازما الأرغون
41	.....4.III النموذج العددي
44	.....5.III الشروط الحدية والأبتدائية
45	.....6.III حساب قيم المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير
46	.....7.III مخطط برنامج الحساب
49	.....8.III الخلاصة

الفصل الرابع: نتائج و تحليل

51	1.IV حساب الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية في شروط عمل Y. Lin et al.
55	.....2.IV تأثير شدة الحقل المغناطيسي
58	.....3.IV تأثير ضغط غرفة التفريغ
61	.....4.IV تأثير فرق الجهد المطبق
64	.....5.IV حساب المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير
69	.....6.IV حساب معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي
70	.....الخلاصة العامة والآفاق
73	.....المراجع

قائمة الجداول

- الجدول (III-1): الثوابت الفيزيائية المستعملة لغاز الأرجون 40
- الجدول (III-2): الشروط الحدية والإبتدائية المستعملة 45
- الجدول (IV-1): القيم المتوسطة لمقادير الماكروسكوبية لبلازما الأرجون عند مناطق مختلفة بين اللبوسين 65

قائمة الأشكال

- 11 الشكل (1-I): رسم تخطيطي لجهاز رش مهبطي.....
- 15 الشكل (2-I): أثر الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي المتوازيان على حركة إلكترون..
- 16 الشكل (3-I): أثر الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي المتعامدان على حركة إلكترون...
- 17 الشكل (4-I): أنواع المهابط المغنطرونية حسب اتجاه خطوط الحقل المغناطيسي.....
- 20 الشكل (1-II): الأشكال الهندسية لمسبار لانجمير.....
- 21 الشكل (2-II): شكل تخطيطي لتركيبية تجريبية لاستقطاب مسبار لانجمير.....
- 22 الشكل (3-II): المميز $I_s(V_s)$ لمسبار لانجمير.....
- 39 الشكل (1-III): رسم توضيحي لهندسة جهاز الرش المهبطي المغنطروني.....
- 48 الشكل (2-III): مخطط سير الحساب العددي حسب الإختيار الأول.....
- 51 الشكل (1-IV): مقارنة بين منحنى كثافة الشحنات لنتائجنا بمنحنى Y Lin et al.
- 52 الشكل (2-IV): التغير الموضعي للكثافة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF ...
- 52 الشكل (3-IV): التغير الموضعي للكثافة الأيونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.....
- 53 الشكل (4-IV): التغير الموضعي للكثافة الأيونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF....
- 53 الشكل (5-IV): التغير الموضعي للحقل الكهربائي لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.....
- 54 الشكل (6-IV): التغير الموضعي للدرجة الحرارة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.
- الشكل (7-IV): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (z) من أجل قيماً للحقل المغناطيسي.....
- 56 الشكل (8-IV): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة شدة الحقل المغناطيسي لضغط
- 57 100 mTorr و 50 mTorr.....
- الشكل (9-IV): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة
- 58 شدة الحقل المغناطيسي لضغط 100 mTorr و 50 mTorr.....
- 59 الشكل (10-IV): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (z) من أجل قيماً

- للضغط غرفة التفريغ
- 60 الشكل (IV-11): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة ضغط غرفة التفريغ.....
- الشكل (IV-12): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة
- 61 ضغط غرفة التفريغ.....
- الشكل (IV-13): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (z) من أجل قيماً لفرق
- 62 الجهد المطبق.....
- 63 الشكل (IV-14): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة فرق الجهد المطبق.....
- الشكل (IV-15): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة
- 63 فرق الجهد المطبق.....
- 66 الشكل (IV-16): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_1 = 0.3 \text{ cm}$
- 67 الشكل (IV-17): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_2 = 1.5 \text{ cm}$
- 68 الشكل (IV-18): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_3 = 2.7 \text{ cm}$

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تعد طريقة توضع الطبقات الرقيقة بجهاز الرش المهبطي المغنطروني من أهم طرق التفريغ المتوهج، إذ تمتاز هذه الأخيرة بإمكانية توضع عوازل ونواقل وأنصاف نواقل للطبقات الرقيقة بنوعية جيدة وعند درجات حرارة منخفضة. نظرا لوجود الحقل المغناطيسي استقرت طريقة الرش المهبطي المغنطروني بسرعة توضع ومردود رش كبيران مع إمكانية إنتاج شرائح رقيقة عالية الجودة ذات خواص ميكانيكية جيدة؛ لأجل هذا عرفت هذه الطريقة صناعيا صدى واسع وانتشار كبير [1].

من أجل إدراك وفهم أكثر لمبدأ الرش المهبطي المغنطروني، قدمت عدة بحوث في العقود الماضية سواء من الناحية التجريبية، التحليلية والعددية لمعالجة البلازما المستعملة من أجل تحديد خصائصها الكهربائية: كالكتافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الحقل الكهربائي، الكمون الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية وغيرها من الخصائص. تم دراستها تجريبيا مثلا بمسبار لانجمير [3،2] أو عدديا بنموذج الموائع [4-6]، نموذج الجسيمات [7] و النموذج الهجين [1].

ركزت بعض البحوث على نموذج الموائع موضوع بحثنا هذا لسلاسة تطبيقه. فحسب نوعية تغذية الرش، تم العمل على نظام DC [5،4،1] وعلى نظام RF [8،6] وحسب الأبعاد، أنجزت أعمال لبعدها واحد [8،5] ولبعدين [6،4،1] حيث كانت درجة الحرارة الإلكترونية ثابتة في كل هذه الأعمال. فيما أُعتبر في أبحاث أخرى معامل الانتشار الإلكتروني مرتبط وفق علاقة أنشتاين بدرجة الحرارة الإلكترونية المتغيرة لنظام DC [9-12] ولنظام RF [13،14] وهذا عند إنعدام الحقل المغناطيسي.

وفي هذا الرسالة سنقوم أولا بدراسة نمذجة للخصائص الكهربائية لبلازما الأروغون المستعملة لتوضع الطبقات الرقيقة بطريقة الرش المهبطي المغنطروني المغذى بمصدر جهد متناوب ذو تردد مذياعي RF 13.56Mhz وهذا بتطبيق نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن وبعدها واحد، حيث سنعتبر الحركية الإلكترونية مرتبطة بالحقل المغناطيسي ومعامل

الإنتشار الإلكتروني مرتبط وفق علاقة أنشتاين بدرجة الحرارة الإلكترونية المتغيرة ، فيما نستخدم الصيغة الأسية لعبارة التدفق. ثم نقوم ثانيا بدراسة تشخيصية لهذه الخصائص الكهربائية بتطبيق النتائج المتحصل عليها من الدراسة الأولى على المشخص الآلي مسبار لانجمير لإيجاد المميز تيار-جهد حسب شكل المسبار ومكان توضع ونستنتج في الأخير معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي.

سنقدم رسالتنا في أربعة فصول على النحو التالي:

الفصل الأول سنتطرق فيه بإيجاز، بدايةً عموميات حول البلازما، تعريفها، ظاهرة ودرجة التأين، الخصائص الكهربائية لها. بعد ذلك نتطرق إلى الرش المهبطي، حيث نذكر فيه الطرق العامة لتوضع الطبقات الرقيقة، مبدأ الرش المهبطي، مردود الرش المهبطي، نوعا الرش المهبطي المستمر DC والمتناوب RF وأخيراً الرش المهبطي المغنطروني.

الفصل الثاني يتضمن أهم الطرق التشخيصية والنمذجية لدراسة بلازما. لتحديد خصائصها الكهربائية، حيث سنتطرق أولاً إلى الطرق التجريبية والمتمثلة في تشخيص البلازما: تقنية التشخيص الضوئي، مطياف الكتلة ومسبار لانجمير. ستكون الدراسة وصفية للطريقتين الأوليين، فيما تكون دراسة تفصيلية لمسبار لانجمير، حيث سنتطرق فيها إلى: مبداءه، أنواعه، نظام تشغيله للحصول على المميز تيار-جهد والفرضيات النظرية الكلاسيكية للانجمير. وفي الأخير نقدم كيفية حساب الخصائص الكهربائية للبلازما بإستعمال المشخص الآلي مسبار لانجمير. وثانياً إلى الطرق النظرية والمتمثلة في نمذجة البلازما سنتطرق بصفة عامة إلى النموذج المجهرى، النموذج الهجين وبإسهاب لنموذج الموائع. سنتناول في هذا الأخير معادلاته الأساسية التي تتم بها معالجة البلازما. وإلى المفاهيم الأساسية لهذا النموذج من فرضيات مُعتمدة ومعاملات إنتقال في وجود الحقل المغناطيسي.

الفصل الثالث نتطرق فيه إلى النموذج الرياضي المستعمل وكيفية تطبيق معادلات نموذج الموائع على بلازما الأرغون، ثم نعرض على النموذج العددي. وإلى الشروط الحدية والإبتدائية المستعمل لحل هذه المعادلات، ثم نتناول بإسهاب كيفية إيجاد المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير من خلال النتائج المتحصل عليها من نموذج الموائع حسب شكل المسبار. وفي الأخير نوضح خريطة سير الحساب العددي لبرنامجنا.

الفصل الرابع سنقوم فيه أولاً بتطبيق نفس الشروط التجريبية المنجزة من طرف Y.Lin et al [14] من أجل حساب الخصائص الكهربائية للبلازما الأرغون كالكتافة

الإلكترونية والأيونية مثلاً. ثم تُتبعها بدراسة ومناقشة تأثير العوامل الماكروسكوبية كشدة الحقل المغناطيسي، ضغط غرفة التفريغ والجهد المطبق على المهبط على كلاً من: الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الحقل الكهربائي، الكمون الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية، كما يجري تطبيقاً للنتائج المتحصل عليها، والمتمثل في إيجاد المميز تيار- جهد للمشخص الآلي مسبار لانجمير حسب شكله ومكان توضع وكذا إستنتاج معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي.

في الأخير نحصل ما قمنا به في خلاصة عامة، ونقدم فيها بعض الإقتراحات التي قد تكون منطلقات لأعمال أخرى.

الفصل الأول

الفصل الأول

عموميات حول البلازما والرش المهبطي

إن إستخدام الشرائح الرقيقة في ميدان الإلكترونيات الدقيقة يستوجب تحديد خصائص لهذه الشرائح وطريقة توضع تختار بعناية. ومن ضمن الطرق المستعملة لتوضع الشرائح الرقيقة طريقة الرش المهبطي، والتي يعتمد مبدأ عملها على التفريغ المتوهج أي البلازما. لهذا السبب إرتأينا أن نقدم في هذا الفصل المفاهيم الأساسية للبلازما، ثم نتطرق بعناية لطريقة الرش المهبطي، مركزين في ذلك على الرش المهبطي المغنطروني المستخدم في عملنا هذا.

1.1. عموميات حول البلازما:

1.1.1. تعريف البلازما:

البلازما هي الحالة المادية الرابعة، وهي عبارة عن وسط غازي متأين يحوي عدداً كبيراً وكافياً من الجسيمات المشحونة سلبياً (إلكترونات وأيونات سالبة) والجسيمات المشحونة إيجابياً (أيونات موجبة) والجسيمات المحايدة، هذا الوسط يحجب نفسه إلكتروناتياً عند مسافة صغيرة [15].

2.1.1. ظاهرة ودرجة التأين:

تأين مادة هو ظاهرة إنشاء شحن حرة داخلها. ففي الحالة الطبيعية تكون الغازات بمثابة عوازل كهربائية (متعادلة كهربائياً)، وبتطبيق حقول كهربائية عالية التوتر تتحول إلى نواقل كهربائية؛ تسمى هذه الظاهرة بالتأين الكهربائي لغاز أو بالتفريغ الكهربائي الغازي (بلازما التفريغ) [15]. يمكن أيضاً الحصول على غاز مؤين عن طريق رفع درجة حرارته $T = 10^4 \text{ }^\circ\text{C}$ أين الطاقة الحرارية المتوسطة للحركة الإنسحابية تقارب طاقة التأين عند التوازن الحراري، ونسمي حينئذٍ، هذا التأين بالتأين الحراري.

هذا الغاز المؤين (البلازما) يحوي إلكترونات بكثافة عددية n_e وشحنة q_e ، أيونات موجبة بكثافة n_{ip} وشحنة q_{ip} ، أيونات سالبة بكثافة n_{in} وشحنة q_{in} وأخيراً جسيمات حيادية بكثافة n_0 . في سلم ماكروسكوبي تكون البلازما متعادلة كهربائياً، أي:

$$n_e q_e + n_{ip} q_{ip} + n_{in} q_{in} = 0 \quad (\text{I-1})$$

نسمى النسبة بين تركيز الجسيمات المشحونة (كثافة الإلكترونات أو الأيونات) $n_{e,i}$ إلى التركيز الكلي للجسيمات بدرجة تأين غاز α و تعطى بالعلاقة التالية [16]:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0} \quad (\text{I-2})$$

تتغير α عملياً بين 10^{-10} و 1.

يجرى التمييز بين الغازات حسب درجة التأين: الغازات ضعيفة التأين، والغازات قوية التأين [15].

(أ)- الغازات ضعيفة التأين $\alpha < \alpha_0$:

في هذا النوع من الغاز، عدد قليل من الإلكترونات والأيونات يتحرك داخل عمق من الجسيمات المحايدة، أين يكون تردد التصادمات بين الإلكترونات والجسيمات المحايدة v_{e0} أكبر من تردد تصادمات الإلكترونات فيما بينها v_{ee} أو مع الأيونات v_{ei} ؛ أي أن:

$$v_{e0} > v_{ee} \approx v_{ei}$$

(ب)- الغازات قوية التأين $\alpha > \alpha_0$:

وتكون عكس الغاز الأول أي $v_{e0} < v_{ee} \approx v_{ei}$ ونميز نوعين لها:

• غاز قوي التأين مع تفاعل ضعيف للجسيمات:

في هذه الحالة تكون مسارات الجسيمات المشحونة التي لا تتصادم فيما بينها وفقا للحقل الكهرومغناطيسي الخارجي، وهي البلازما ضعيفة الكثافة كالرياح الشمسية.

• غاز قوي التأين مع تفاعل الجسيمات:

أين تتفاعل إلكترونات الغاز مع عدد كبير من الجسيمات المشحونة الأخرى.

حيث: α_0 القيمة الحرجة لدرجة التأين وهي خاصة بكل غاز أي $v_{e0} = v_{ee} = v_{ei}$.

3.1.I. الخصائص الكهربائية للبلازما:

مهما اختلفت طرق إنتاج البلازما سواء الكهربائية أو الحرارية فإنها جميعاً تتميز بخصائص كهربائية ثابتة، نذكر منها كمون البلازما، الكمون العائم، الكثافة الإلكترونية، درجة الحرارة الإلكترونية، الكثافة الأيونية الموجبة والسالبة، طول دوباي وطول لاندي...

إن معرفتنا لهذه الخصائص تسمح لنا بتفسير بعض الظواهر الفيزيائية؛ وخاصة تلك المتعلقة بتفاعل بلازما-سطح نقش (gravure)، توضع (déposition)....

في الفقرات الموالية سنقدم بعض المفاهيم الفيزيائية لأهم الخصائص الكهربائية المميزة للبلازما.

(أ)- كمون البلازما (V_p Potentiel plasma):

كمون البلازما هو الكمون الكهربائي الساكن المتوسطي لحاملات الشحنة، ويكون موجب بالنسبة لجدران الغرفة المحيطة بالبلازما وثابت في قلبها [17].

(ب)- الكمون العائم (V_f Potentiel flottant):

نعتبر بلازما متعادلة كهربائياً داخل غرفة معزولة تحت الفراغ، بسبب الفرق الكبير بين حركية الإلكترونات والأيونات يكون عدد الإلكترونات الواردة إلى جدار الغرفة أكبر من عدد الأيونات؛ جدار الغرفة يشحن إذن بكمون سالب بالنسبة إلى كمون البلازما، يسمى كمون الجدار بالكمون العائم، إثر وجود هذا الأخير تتشكل بالقرب من الجدار منطقة تدعى الغمد حيث تكون داخلها الإلكترونات سريعة جدا فيما الأيونات تتسارع باتجاه الجدار، وفقا لذلك تكون هذه المنطقة مستقرة [18].

(ج)- كثافة الجسيمات المشحونة n :

ليست البلازما مجرد تكديس للجسيمات المشحونة لهذا وجب علينا التطرق لها من وجهة نظر الفيزياء الإحصائية؛ وهذا باستخدام عبارات إحصائية تدعى دوال توزيع السرعات لكل صنف داخل البلازما.

دالة التوزيع f :

في لحظة معينة، تتميز حركة جزيء غازي بشعاع الموضع \vec{r} وشعاع السرعة \vec{v} ، نمثل الموضع بنقطة في الفضاء الاعتيادي وشعاع السرعة بنقطة في فضاء السرعات، في كل من هذين الفضائين نعتبر حجمين عنصريين $dr = dx dy dz$ و $dV = dV_x dV_y dV_z$ يتمركزان على التوالي حول النقطتين ذات الإحداثيات (x, y, z) و (V_x, V_y, V_z) . نعرف dn عدد جزيئات الغاز أين تكون النقاط الممثلة للموضع داخل dr وللسرعات داخل dV بالعلاقة التالية [19]:

$$dn = f(V, r, t) dr dV \quad (I-3)$$

$f(V, r, t)$: تدعى دالة توزيع السرعات، ويمكن أن تكون:

- مستقرة، إذا كانت لا تتعلق بـ t أي $\left(\frac{df}{dt}\right)=0$.
- متجانسة، إذا كانت لا تتعلق بـ r .
- موحدة الخواص، إذا كانت لا تتعلق بطويلة \vec{V} و باتجاهه.

إذا كانت البلازما في حالة توازن تروموديناميكي تأخذ دالة توزيع سرعات الإلكترونات شكل ماكسويل الذي يعبر عن تصادم الإلكترونات ببعضها أثناء حركتها الحرارية العشوائية [20]:

$$f(V_e) = n_e \left(\frac{m_e}{2\pi K_B T_e} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m_e V_e^2}{2K_B T_e} \right) \quad (I-4)$$

حيث:

K_B : ثابت بولتزمان، m_e : كتلة الإلكترون، T_e : درجة الحرارة الإلكترونية، V_e : السرعة الإنسحابية للإلكترونات.

من خلال دالة التوزيع نستطيع حساب المقدار المتوسطي $\langle x \rangle$: كالكتافة، السرعة المتوسطة، الطاقة المتوسطة بإستعمال العلاقة التالية [21]:

$$x(r, t) = \frac{1}{n(r, t)} \iiint x f(r, V, t) d^3V \quad (I-5)$$

(د)- درجة حرارة الإلكترونات T_e :

درجة حرارة الإلكترونات هي درجة الحرارة التي تتساوى عندها طاقة التحريض الحراري مع الطاقة الحركية المتوسطة.

$$\left\langle \frac{1}{2} m_e V_e^2 \right\rangle = \frac{3}{2} K_B T_e \quad (I-6)$$

(ه) - تردد البلازما ω_p :

من الصفات المهمة للبلازما تعادلها كهربائياً، فعند حدوث اضطراب نتيجة للزيادة المفرطة للشحن الكهربائي لا تلبث البلازما إلا أن تعود إلى حالة التوازن. هذه العملية تتسبب عموماً في توليد تذبذب نواسي غير متخامد لإلكترونات البلازما نبضه ω_{pe} وتردده f_{pe} تعطى على التوالي بالعلاقتين (I.7) (I.8). ولأيونات البلازما تذبذب نبضه ω_{pi} وتردده f_{pi} تعطى على التوالي بالعلاقتين (I.9) (I.10) [15].

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (I-7)$$

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (I-8)$$

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{n_i e^2}{m_i \epsilon_0}} \quad (I-9)$$

$$f_{pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_i e^2}{m_i \epsilon_0}} \quad (I-10)$$

حيث: e شحنة الكهربائية، m_i كتلة الأيون و ϵ_0 السماحية الكهربائية للفراغ.
بالتطبيق العددي نجد:

$$f_{pe} (Hz) = 9000 \sqrt{n_e} (cm^{-3}) \quad (I-11)$$

(و) - المقطع الفعال للتصادم σ_{AB} :

يمكن التعبير عن مدى تصادم جسمين بمقدار المقطع الفعال للتصادم. وفي حالة تصادم جسمين (حياديين) A و B يبلغ نصف قطرهما r_A و r_B على التوالي فإن المقطع الفعال حسب النظرية الحركية يساوي مساحة دائرة نصف قطرها $(r_A + r_B)$ (القطر الفعال) [20].

$$\sigma_{AB} = \pi (r_A + r_B)^2 \quad (I-12)$$

2.I. الرش المهبطي (Pulvérisation cathodique) :**1.2.I. طرق توضع الطبقات الرقيقة:**

نسمي طبقة رقيقة كل شريحة ذات سمك مجهري. تصنف تقنيات التوضع بالطور الغازي إلى طريقتين تستعملان لتوضع الطبقات الرقيقة في الفراغ وعند ضغط منخفض وهما [22]:

(أ)- طريقة التوضع الكيميائي في الطور البخاري (CVD) (Chemical Vapor Deposition):

طريقة التوضع الكيميائي في الطور البخاري عبارة عن طريقة تتفاعل فيها مكونات الغاز لتكوين شريحة صلبة فوق مساحة تعرف بالمسند، وهي طريقة تستخدم منذ عدة سنوات في قطاعات النشاط المتقدمة، كالإلكترونيك وعلم الطيران والزخرفة...، حيث تتدخل في هذه الطريقة عدة وسائط كالضغط، ودرجة الحرارة، والبلازما... إلخ، وهذا ما يميز تصنيفها إلى عدة أصناف:

- فحسب الضغط تصنف إلى: LPCVD وهذا في الضغط المنخفض، HPCVD إذا كان الضغط مرتفعاً.
- إذا كان الوسيط المستعمل بلازما تسمى التقنية CVD بـ PECVD وتتم عملية الترسيب في درجة حرارة منخفضة.

(ب)- طريقة التوضع الفيزيائي في الطور البخاري (PVD) (Physical Vapor Deposition):

طريقة التوضع الفيزيائي في الطور البخاري تتمثل في ترسيب تحت الضغط المنخفض، لبخار مادة معينة على المسند. حسب طريقة الحصول على البخار وطريقة ترسيبه نميز ثلاث تقنيات [23]:

- التبخير الحراري تحت الفراغ؛
- الترسيب الأيوني؛
- الرش المهبطي؛

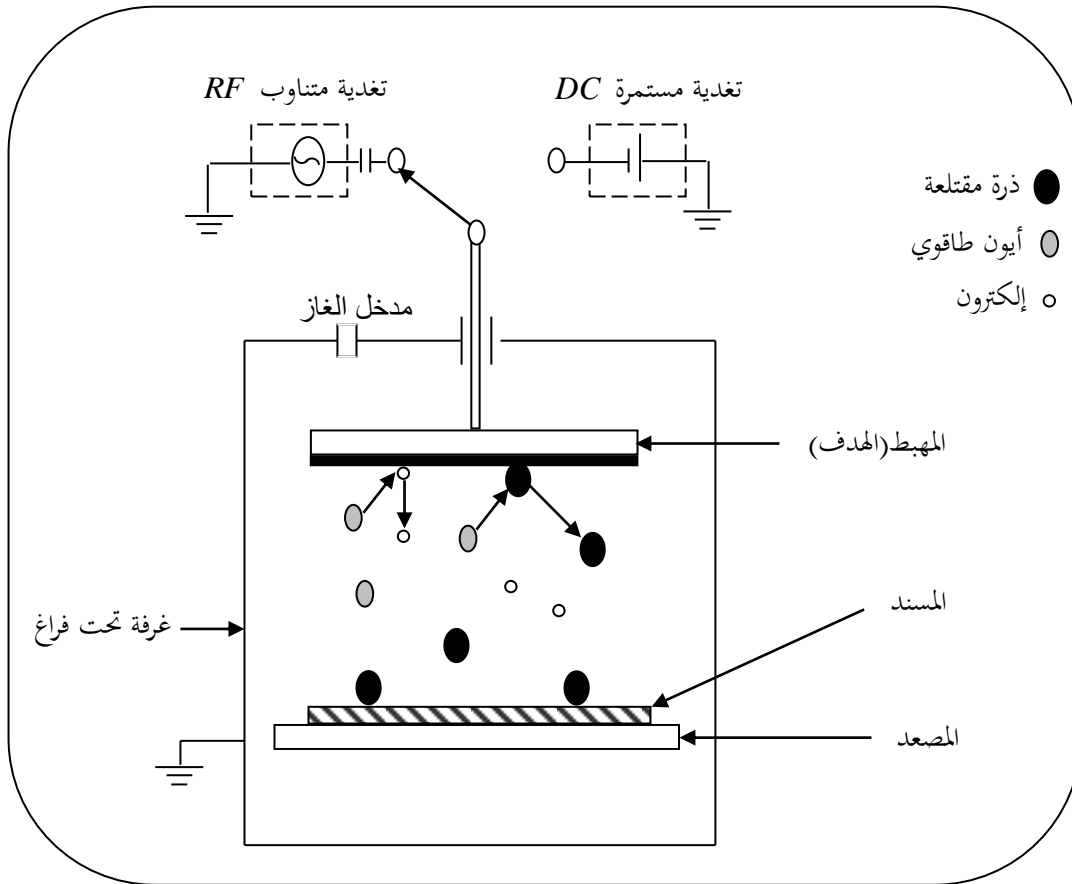
هذه الطريقة (PVD) لها مميزات معتبرة؛ الشرائح فيها كثيفة، التقنية سهلة المراقبة وليست ملوثة...

سننظر في الفقرة الموالية لطريقة الرش المهبطي المعتمدة في بحثنا هذا.

2.2.I. مبدأ الرش المهبطي:

عرفت طريقة الرش المهبطي منذ مدة طويلة، وكما هو موضح في الشكل (1-I) يعتمد مبدأها على إقتلاع ذرات مادة الهدف عن طريق تحويل كمية الحركة. تتم هذه الظاهرة بواسطة أيونات ذات طاقة عالية ناتجة عن تفريغ متوهج لغاز أو خليط غازي داخل غرفة تحت فراغ يتراوح ما بين 10^{-3} - 10^{-5} Pa. عملية التفريغ تتم بواسطة لبوسين متوازيين أحدهما يرتبط بالهدف ويسمى المهبط والثاني بالمسند ويسمى المصعد. يبعد اللبوسان عن بعضهما مسافة تتراوح بين 2-8 cm [24].

الأيونات الطاقوية والتي تكون عموماً أيونات غاز خامل تتسارع بواسطة مجال الحقل الكهربائي لجعلها دائماً متجهة نحو الهدف، فيما الذرات المقتلعة والتي تكون عموماً محايدة كهربائياً تترسب وتتوضع فوق المسند مشكلة شريحة تسمى الطبقة الرقيقة.



الشكل (1-I): رسم تخطيطي لجهاز رش مهبطي [25].

3.2.I. مردود الرش:

يعتبر مردود الرش من أهم الخصائص المميزة لظاهرة الرش، ويعرف على أنه النسبة بين عدد الذرات المقتلعة إلى عدد الأيونات الصادمة أو بعبارة أخرى هو عدد الأيونات المقتلعة لكل أيون صادم. ويعطى بالعلاقة التالية:

$$S = \frac{\text{عدد الذرات المقتلعة}}{\text{عدد الذرات الصادمة}} \quad (\text{I-13})$$

يتأثر مردود الرش S :

طرديا مع:

- طاقة الأيون الصادم.
- كتلة الأيون الصادم.
- الجهد المطبق على المهبط.
- زاوية الصدم.

و عكسيا مع:

- طاقة ربط ذرات مادة الهدف.

و ضئيلا مع:

- درجة حرارة مادة الهدف.

4.2.I. أنواع الرش المهبطي:

بالرجوع إلى الشكل (I-1) نلاحظ طريقتين للرش وذلك حسب الجهد المطبق على المهبط:

- الرش المهبطي المستمر.
- الرش المهبطي المتناوب.

(أ)- الرش المهبطي المستمر:

ويستعمل هذا النوع من الرش عندما تكون مادة الهدف ناقلة أو نصف ناقلة، حيث يتم تطبيق جهداً سالباً مستمراً على المهبط يتراوح بين 3-5KV يسمح بتأين ذرات الغاز وجذبها نحو المهبط لتقلع ذراته، حيث تترسب هذه الأخيرة فوق المسند مشكلة شريحة رقيقة ناقلة أو نصف ناقلة.

(ب)- الرش المهبطي المتناوب:

ظاهرة الرش المستمر غير صالحة عندما تكون مادة الهدف عازلة لأن الشحنات القادمة مع الأيونات لا يمكنها الانفصال. لذلك عند توضع مادة عازلة يمكن استخدام، إما هدف نصف ناقل أو ناقل مع غاز فعال كيميائياً وتعرف هذه العملية بالرش المتفاعل، أو يمكن التخلص من ظاهرة التصاق الشحنات بالهدف العازل تماماً بتعويض مصدر الجهد المستمر بمصدر جهد متناوب [22]. هذا الاستقطاب المتناوب للهدف يجعله تارة جاذب للأيونات خلال نصف الاهتزازة السالبة، إلى أن يشحن بكمون موجب مما يؤدي إلى توقف عملية جذب الأيونات و بالتالي عملية الرش ويجعله جاذب للإلكترونات تارة أخرى خلال نصف الاهتزازة الموجبة إلى أن تتعادل مع الشحنات الموجبة المتوضعة سابقاً على سطح الهدف.

تصنف ترددات الإستقطاب المتناوب للهدف إلى نوعين [26]:

• الترددات الضعيفة:

عند الترددات الأقل من 50Hz لا تحدث عملية الترسب، لأن الأيونات تجد الوقت الكافي لصدم المهبط أثناء الإهتزازة السالبة و رش الطبقة المترسبة أثناء الاهتزازة الموجبة.

• الترددات العالية:

عند الترددات العالية لا يوجد للأيونات الوقت الكافي لصدم اللبوسين وذلك لضعف حركيتها وكبر كتلتها، فيما الإلكترونات بما تمتاز به من حركية سريعة تتراكم على سطح الهدف العازل مولدة جهداً سالباً يسمى بالإستقطاب الذاتي الذي يعوض الجهد السالب المطبق في حالة الرش المستمر بحيث تتعادل الشحن الموجبة والسالبة

وينعدم التيار خلال الإهتزازة الواحدة. دلت الأبحاث على أن أحسن تردد عملي في الترددات العالية هو التردد المذياعي 13,56MHz ومضاعفاته، إذ أنه يعطي للإلكترونات الحرة داخل البلازما حركية عالية جدا مما يزيد في قدرتها على إحداث تأين.

5.2.I. الرش المهبطي المغنطروني (Pulvérisation cathodique magnétron):

في إطار تحسين خصائص الطبقات الرقيقة، سعى الباحثون كل من وجهة نظره إلى تطوير طرق الرش المهبطي الثنائي، إذ تمحورت أفكارهم في التركيز على زيادة مردود الرش وبالتالي زيادة سرعة التوضع. إستجابةً لهذا الغرض تم تطبيق مجال مغناطيسي موازي لسطح الهدف يسمح بحصر مسارات الإلكترونات بجوار الهدف، مما يسمح برفع عملية تأين البلازما بالقرب من هذا الهدف، وتعرف هذه الطريقة بطريقة الرش المهبطي المغنطروني [27]. الفقرة الموالية تعرض تفاصيل أكثر عن هذه الطريقة.

1. قوة لورنتس:

إن الأثر الجدير بالذكر في طريقة الرش المهبطي المغنطروني هو فعل قوة لورنتس. تعرف قوة لورنتس على أنها القوة التي تتعرض لها شحنة كهربائية عندما تتحرك داخل مجال كهرومغناطيسي وتعطى عبارتها بالصيغة التالية:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (I-14)$$

حيث: \vec{F} القوة الكهرومغناطيسية، \vec{E} الحقل الكهربائي، \vec{B} الحقل المغناطيسي، \vec{V} و q سرعة وشحنة الجسيم المشحون على التوالي.

2. أنواع الرش المهبطي المغنطروني:

أكثر شيء نلمسه في قوة لورنتس هو تغيير مسار الشحنة الكهربائية وخاصة مسار الإلكترون، فحسب وضعية إتجاه الحقل المغناطيسي مع إتجاه الحقل الكهربائي نجد نوعان للتفريغ المغنطروني [25]:

(أ)- الحقل المغناطيسي موازي للحقل الكهربائي [25]:

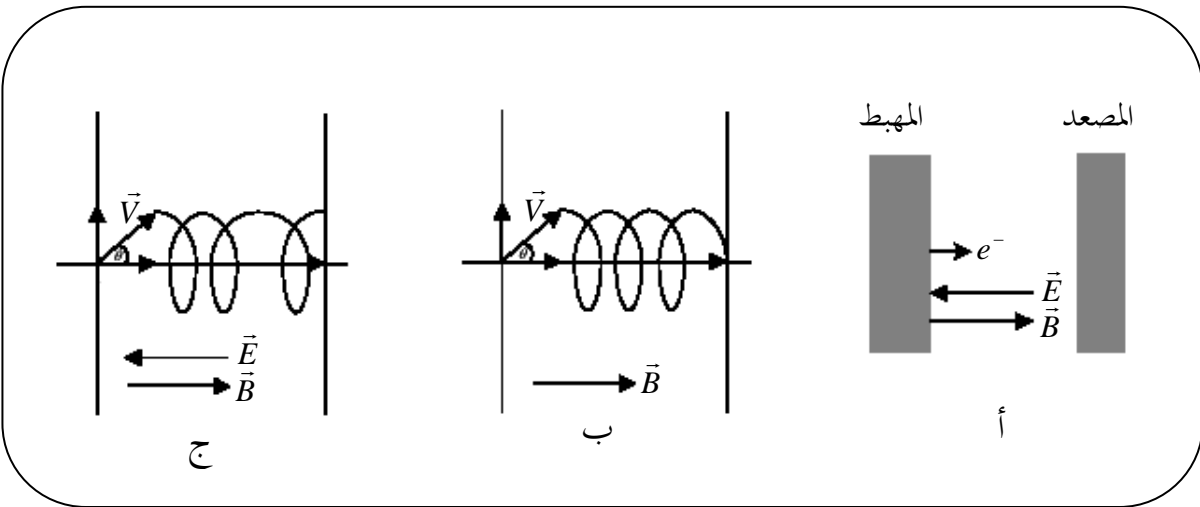
عندما نطبق بين اللبوسين حقل مغناطيسي موازي للحقل الكهربائي، الإلكترون الثانوي المنبعث مباشرة من سطح الهدف ينتقل على طول محور الحقل المغناطيسي ولا يتأثر به، أي سرعة الإلكترون الثانوي \vec{V} والحقل \vec{B} يكونا متوازيان بالتالي الجداء الشعاعي في صيغة قوة لورنتس ينعدم ومنه الإلكترون الثانوي يتسارع فقط بالحقل الكهربائي (الشكل (I-2-أ)).

وعندما ينبعث الإلكترون الثانوي من المهبط بسرعة تصنع زاوية θ مع الحقل المغناطيسي، وإذا كان الحقل الكهربائي مهملًا فإن الإلكترون الثانوي يتحرك تحت تأثير القوة المغناطيسية فقط على دائرة نصف قطرها ثابت r ، وتكون هذه الدائرة على المستوي العمودي على الحقل المغناطيسي.

الإلكترون الثانوي يتحرك في هذه الحالة حركة حلزونية وينتقل بسرعة ثابتة على طول محور الحقل المغناطيسي (الشكل (I-2-ب)).

أما إذا كان الحقل الكهربائي غير مهمل لا تبقى سرعة الإلكترون الثانوي ثابتة على طول محور الحقل المغناطيسي بل يتسارع مع الحقل الكهربائي (الشكل (I-2-ج)).

إن الحقل المغناطيسي الموازي للحقل الكهربائي يزيد في زمن ظهور الإلكترون بين اللبوسين بالتالي زيادة احتمال التصادم مع الأيونات والتأين.

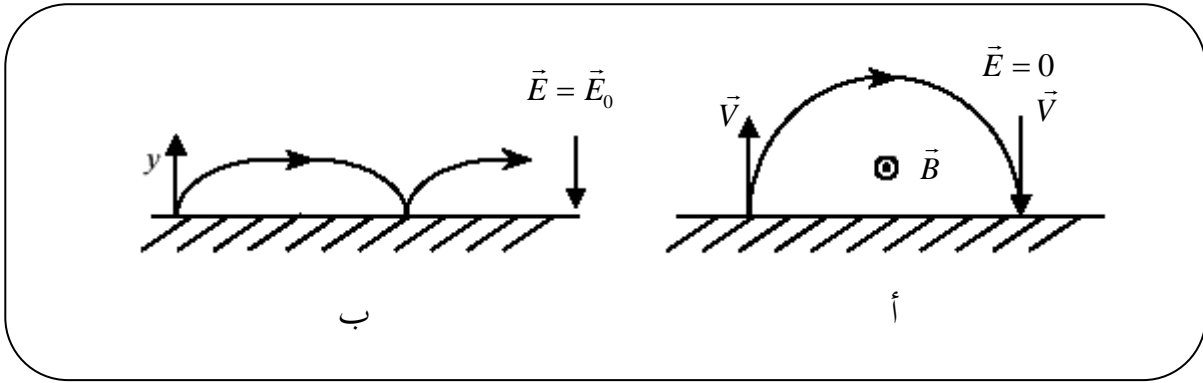


الشكل (I-2): أثر الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي المتوازيان على حركة إلكترون [25].

(ب)- الحقل المغناطيسي عمودي على الحقل الكهربائي [25]:

ليكن الإلكترون الثانوي منبعث بسرعة v عمودية على سطح الهدف في منطقة ذات حقل مغناطيسي وحقل كهربائي ضعيف. تحت تأثير قوة لورنتس، الإلكترون الثانوي يتحرك بنصف دائرة. في هذه الحالة إذن الإلكترون الثانوي لا يتعرض لأي تصادم ويعود إلى سطح الهدف بنفس سرعة الإصدار. ومنه يكون أثر الحقل المغناطيسي على الإلكترون الثانوي هو جذبته لسطح الهدف (الشكل (I-3-أ)).

عندما نضيف حقل كهربائي عمودي على حقل مغناطيسي، الإلكترونات الثانوية الصادرة من المهبط تتسارع باتجاه المصعد، ثم تنحرف بسبب الحقل المغناطيسي (الشكل (I-3-ب)).



الشكل (I-3): أثر الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي المتعامدان على حركة إلكترون [25].

3. أنواع المهابط المغنطرونية:

(أ)- حسب الشكل الهندسي للمهبط نميز نوعان [26]:

- المغنطرون المستوي:
- وهو نوعان، المغنطرون المستوي الدائري والمغنطرون المستوي المستطيلي.
- المغنطرون الأسطوانى:
- وهو نوعان، المغنطرون الأسطوانى على شكل قضيب والمغنطرون الأسطوانى المجوف.

(ب)- حسب اتجاه خطوط الحقل المغناطيسي نميز نوعان كذلك:
مغنترون متوازن ومغنترون غير متوازن (الشكل (4-I)). في كلا النوعين تكون قيمة الحقل المغناطيسي تتراوح بين 200-500 Gauss [25].

• **المغنترون المتوازن:**

في المغنترون المتوازن تكون جميع خطوط الحقل المغناطيسي مغلقة على سطح المهبط.

• **المغنترون غير المتوازن:**

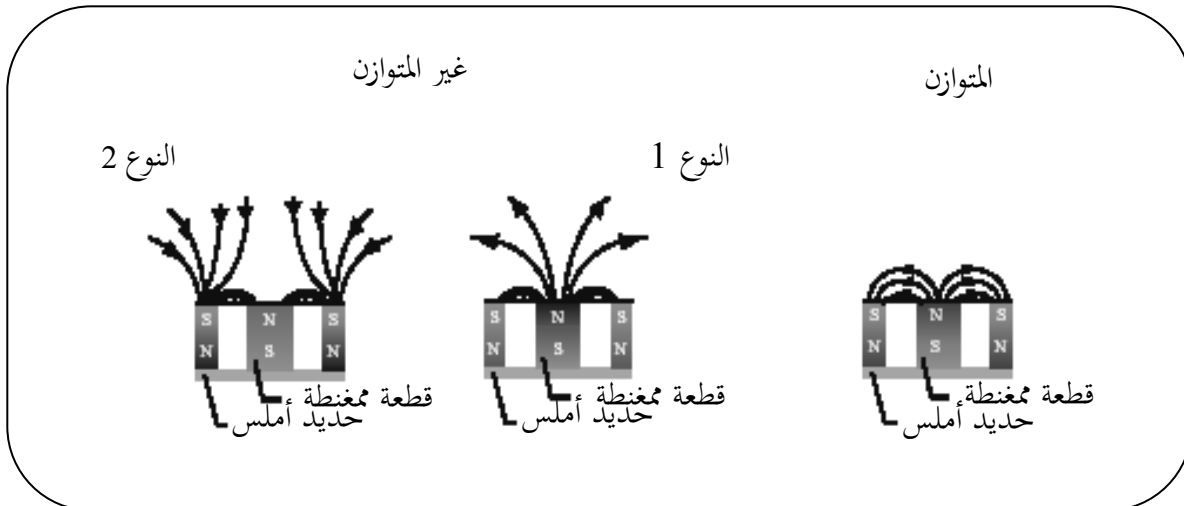
وهو عكس النوع السابق وهو على نوعين:

(أ)- النوع الأول:

تكون الإلكترونات المنبعثة من المهبط منحرفة، والتيار الأيوني الذي يسري في اتجاه المصعد الكتلي يكون كبير جدا بالنسبة للتيار الإلكتروني.

(ب)- النوع الثاني:

تتقارب الإلكترونات من سطح المهبط وتتوجه نحو المصعد، في هذه الحالة التيار الإلكتروني أكبر من التيار الأيوني الذي يسري في اتجاه المصعد الكتلي.



الشكل (4-I): أنواع المهابط المغنترونية حسب اتجاه خطوط الحقل المغناطيسي [25].

الفصل الثاني

تشخيص ونمذجة بلازما الرش المهبطي

من أجل تحسين أكثر لخصائص الطبقات الرقيقة المحضرة بطريقة الرش المهبطي المغنطروني، قدمت عدة أبحاث لدراسة أنواع ووسائط تحضير هذه الرقائق، ركزت بعضها على معالجة أهم عامل فعال لعملية التوضع ألا وهو البلازما. لهذا السبب ارتأينا أن نقدم في هذا الفصل أهم الطرق المستعمل لدراسة البلازما، حيث يتم عموما تحديد خصائصها الكهربائية إما تجريبيا وهذا بتشخيص البلازما بطريقة التشخيص الضوئي، مطياف الكتلة ومسبار لانجمير أو نظريا وهذا بنمذجة البلازما بالنموذج المجهرى، نموذج الموائع والنموذج الهجين، سنركز على نموذج الموائع ومسبار لانجمير موضوعا بحثنا هذا.

1.II. تشخيص البلازما:

تصنف البلازما حسب درجة التأين أو الكثافة ودرجة الحرارة الإلكترونية، فالتحديد التجريبي لهذين الأخيرين وغيرهما من الخصائص الكهربائية للبلازما سنتطرق في هذا الفصل إلى أهم التقنيات المستعملة لتشخيص البلازما: التشخيص الضوئي، مطيافية الكتلة ومسبار لانجمير. ستكون الدراسة وصفية للطريقتين الأوليين، فيما تكون الدراسة تفصيلية لمسبار لانجمير أحد فروع بحثنا هذا.

1.1.II. تقنية التشخيص الضوئي:

إن الإنتقالات العفوية والقسرية (الإنبعاث)، للإلكترونات بين مستويات الطاقة تتسبب في الإصدار الضوئي للمادة. إذ أن طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عن ذرات بلازما التفريغ يكون محملاً بجملة معلومات عن خصائص التفريغ الكهربائي. الدراسة التحليلية لهذا الطيف تسمح لنا بتحديد طبيعة وكثافة ودرجة حرارة مختلف جسيمات البلازما دون التأثير عليها (إضطرابها) [28].

2.1.II. مطيافية الكتلة:

التشخيص بمطيافية الكتلة، هو التحليل الكمي والكيفي لمختلف أصناف الذرات والجزيئات، الحيادية والمشحونة للبلازما.

3.1.II. مسبار كهربائي ساكن:

أول من عمل على مسبار كهربائي ساكن كأداة فعالة لتشخيص التفريغ الكهربائي المنخفض الضغط، هو العالم إرفنغ لانجمير Irving Langmuir سنة 1920 [29].

يسمح تشخيص البلازما بمسبار لانجمير بتحديد خصائصها الداخلية: الكثافة الأيونية، الكثافة الإلكترونية، درجة الحرارة الإلكترونية، كمون البلازما، الكمون العائم والطاقة المتوسطة وكذا دالة توزيع الطاقة الإلكترونية. يتميز مسبار لانجمير عن غيره من طرق التشخيص السابقة الذكر بأنه يعطي معلومات محلية عن البلازما [29]. لهذا السبب إرتكزت بعض الاتجاهات والدراسات العلمية لتشخيص البلازما بهذه التقنية.

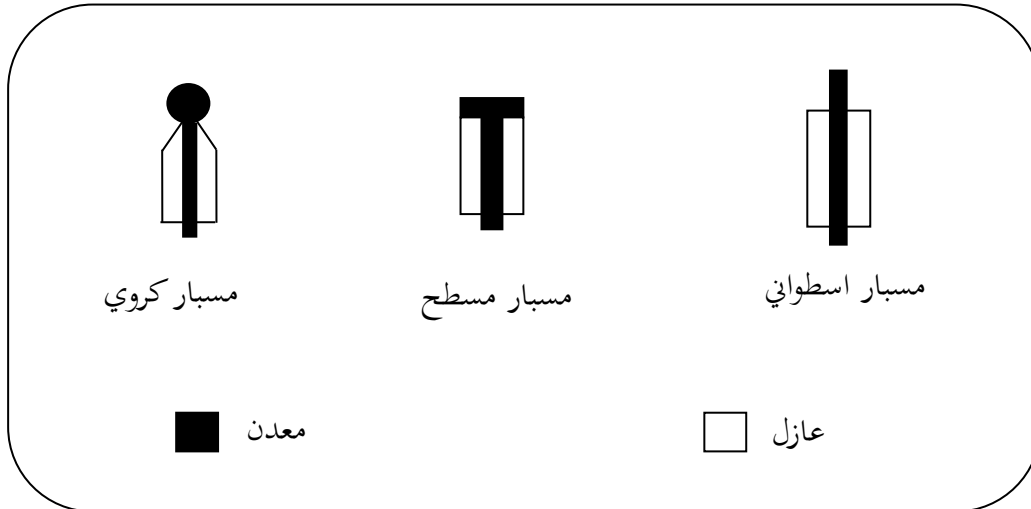
4.1.II. أساسيات مسبار لانجمير:

إخترنا في عملنا هذا التشخيص بمسبار لانجمير لهذا سنتطرق له بصورة تفصيلية في الفقرات الموالية: مبداه، أنواعه، نظام تشغيله للحصول على المميّز تيار-جهد، فرضيات النظرية الكلاسيكية للانجمير وغيرها من أساسيات المسبار.

1.4.1.II. مبدأ عمل مسبار لانجمير:

مسبار لانجمير عبارة عن ناقل معدني صغير الأبعاد، مغمور داخل البلازما، مستقطب كهربائياً بفرق جهد مستمر يسمح بتجميع تيار داخله. يتعلق هذا التيار بكثافة الجسيمات القريبة من المسبار وبدالة توزيع السرعات.

تختلف هندسة المسبار من شكل إلى آخر: كروي، مسطح، اسطواني [28]، وتكون صغيرة المساحة لتقليل الاضطراب داخل البلازما (الشكل (1-II)).



الشكل (1-II): الأشكال الهندسية لمسبار لانجمير [28].

II.2.4.1. أقسام وأنواع مسبار لانجمير:

يمكننا تمييز قسمين من المسابير [17]:

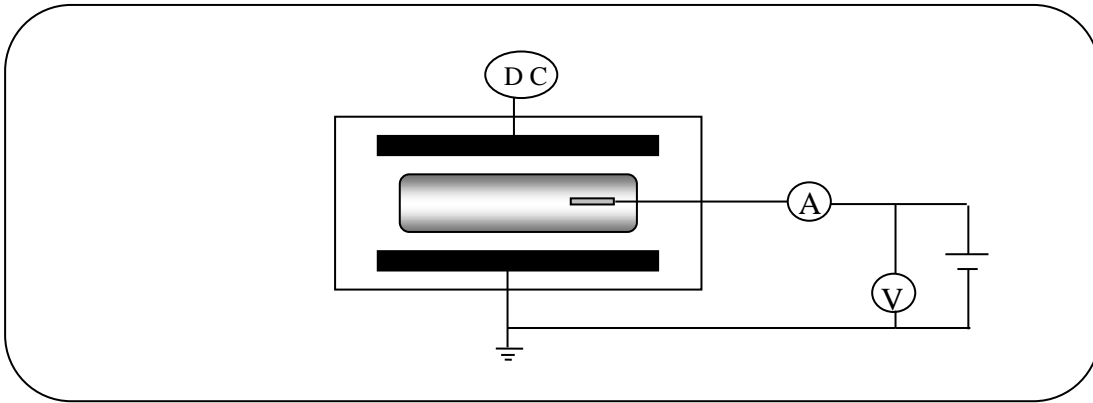
- المسبار النشط أو الكهربائي.
- المسبار غير الفعال أو المجمع.

نميز نوعين في كل قسم:

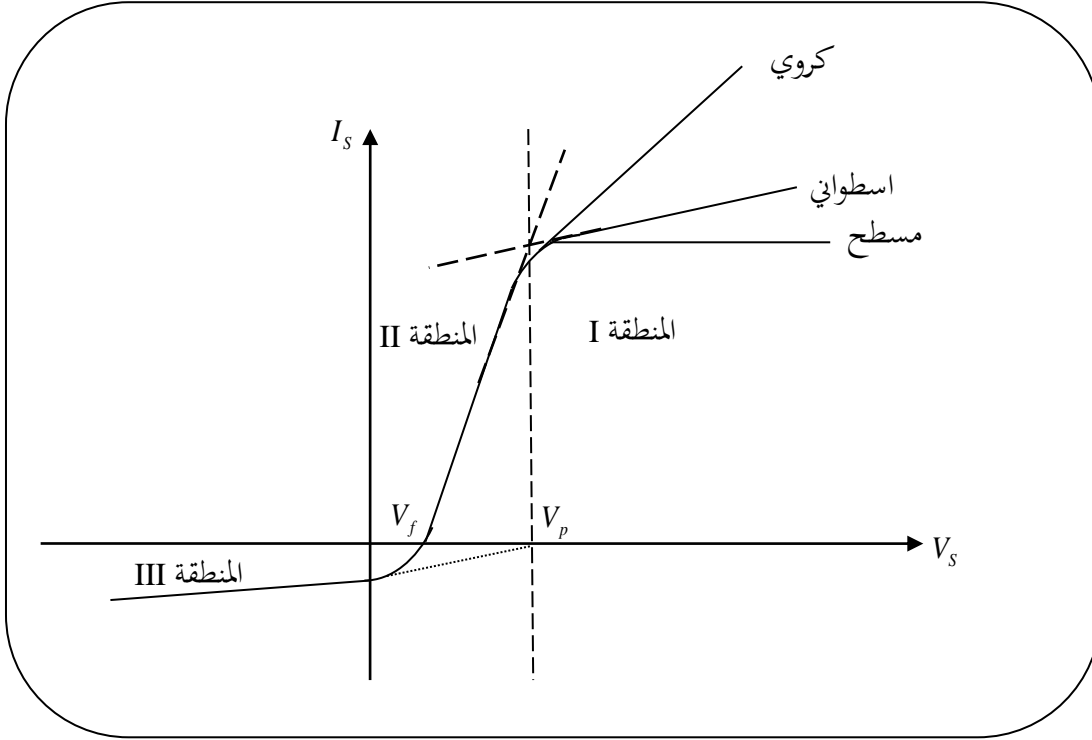
- (أ)- مسبار بسيط: ويتكون من ناقل وحيد ويستقطب بالنسبة إلى كمون مرجعي.
 (ب)- مسبار متعدد العوائم: ويتكون من عدة نواقل مستقطبة بالنسبة إلى بعضها البعض.

II.3.4.1. نظام تشغيل مسبار لانجمير:

يوضح الشكل (II-2) التركيبية التجريبية لإستقطاب مسبار لانجمير مغمور داخل بلازما بجهد مستمر. هذه التركيبية تسمح لنا بالحصول على المميز تيار-جهد، إذ يعتمد شكل هذا الأخير على هندسة المسبار (الشكل (II-3)).



الشكل (II-2): شكل تخطيطي لتركيبية تجريبية لاستقطاب مسبار لانجمير [25].



الشكل (II-3): المميز $I_s(V_s)$ لمسبار لانجمير [30].

حسب الجهد المطبق على المسبار نقسم المميز $I(V)$ إلى ثلاثة مناطق [31,32] :

المنطقة الأولى ($V_s > V_p$):

عندما نطبق على المسبار كمون V_s أكبر من كمون البلازما V_p فإن الإلكترونات والأيونات السالبة تتجذب نحو المسبار عكس الأيونات الموجبة التي ترتد عليه، إن هذا التجمع الكبير للشحن السالبة حول المسبار يشكل طبقة رقيقة تسمى الغمد الإلكتروني، في هذه الحالة التيار الكلي الساري في المسبار تيار إلكتروني، وتوافق المنطقة (I) من المميز منطقة التشبع الإلكتروني.

حيث يأخذ التيار الإلكتروني قيمة ثابتة في الشكل المسطح للمسبار وفق المعادلة (II-1) [33]، وإذا كانت دالة توزيع سرعات للإلكترونات تخضع لتوزيع ماكسويل فإن التيار الإلكتروني يأخذ عبارة تحليلية في الشكل الأسطواناني و الكروي للمسبار تعطى بالمعادلتين (II-2) و (II-3) على التوالي [25,34].

$$I_s = |I_e| = A_s n_e e \sqrt{\left(\frac{K_B T_e}{2\pi m_e}\right)} \quad (\text{II-1})$$

$$I_s = |I_e| \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(1 + \frac{e(V_s - V_p)}{K_B T_e}\right)} \quad (\text{II-2})$$

$$I_s = |I_e| \left(1 + \frac{e(V_s - V_p)}{K_B T_e}\right) \quad (\text{II-3})$$

A_s مساحة الجزء النشط من المسبار.

المنطقة الثالثة ($V_s \ll 0$):

عندما نطبق على المسبار كمون V_s أكثر سالبية فإن تصرف الجسيمات المشحونة حيال المسبار يكون عكس المنطقة الأولى، تنجذب الأيونات الموجبة وترتد الشحنات السالبة، بالتالي يتشكل غمد أيوني حول المسبار. التيار الكلي لهذه المنطقة يكون تياراً أيونياً ووافق منطقة التشبع الأيوني من المميز $I(V)$ ؛ وهي المنطقة (III). المعادلات المعبرة عن التيار الأيوني لهذه المنطقة حسب شكل المسبار مسطح، إسطواني وكروي هي على التوالي (II-4)، (II-5) و (II-6) [25،34،33].

$$I_s = |I_i| = A_s n_i e \sqrt{\left(\frac{K_B T_e}{2\pi m_i}\right)} \quad (\text{II-4})$$

$$I_s = |I_i| \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(1 - \frac{e(V_s - V_p)}{K_B T_e}\right)} \quad (\text{II-5})$$

$$I_s = |I_i| \left(1 - \frac{e(V_s - V_p)}{K_B T_e}\right) \quad (\text{II-6})$$

المنطقة الثانية ($2V_f \leq V_s \leq V_p$):

تسمى المنطقة (II) من المميز بالمنطقة الإنتقالية. فمن أجل ($V_s < V_f$) تكون الإلكترونات سريعة جدا ويبدأ تغلب كمون دفع المسبار الذي يسمح بجذب الأيونات دون القدرة على دفع كل الإلكترونات، عندما ($V_s = V_f$) يكون التيار الكلي للمسبار معدوماً وهذا راجع لتساوي سعتي التيار الإلكتروني والتيار الأيوني، وإذا كان ($V_f < V_s < V_p$) فإن التيار الإلكتروني يزداد بصورة سريعة و يكون دالة شبه أسية (المعادلة (II-7))، عند كمون البلازما ($V_s = V_p$) لا وجود للحقل الكهربائي والتيار المسبار يكون ناجماً عن السرعة الحرارية للجسيمات [35،29].

$$I_s = A_s n_e e \sqrt{\frac{K_B T_e}{2\pi m_e}} \exp\left(-e \frac{|V_s - V_p|}{K_B T_e}\right) \quad (\text{II-7})$$

نلاحظ في المنحنى $I(V)$ تمايز كبير بين تيارى التشبع الإلكتروني والأيوني وهذا راجع للفرق بين كتلة وحركية، الإلكترونات والأيونات.

II.4.4.1. فرضيات النظرية الكلاسيكية للانجمير:

حتى يكون مسبار لانجمير أداة فعالة لتشخيص البلازما لابد من توفير شروط إستعماله. تجلت هذه الشروط في النظرية الكلاسيكية للانجمير، التي أحصى فرضياتها كل من [36] S.Wintz et al.، [37] A.Hallil، [38] J.T.Wilson في النقاط التالية :

1. تركيز الإلكترونات والأيونات يكون متماثل.
2. كثافة وتوزيع سرعة حاملات الشحنة (الإلكترونات والأيونات) تكون معروفتين على حافة الغمد.
3. قطر المسبار r_s (اسطواني وكروي) يكون صغيراً مقارنة مع متوسط المسار الحر للإلكترونات وللأيونات ($L_{en} > L_{in} \gg r_s$) ومع أبعاد البلازما طول دوباي ($\lambda_D \gg r_s$).
4. ضغط الغاز يكون منخفضاً لتجنب التصادمات داخل الغمد، هذا ما يجعل متوسط المسار الحر للإلكترونات وللأيونات كبيراً جداً أمام طول دوباي ($L_{en} > L_{in} \gg \lambda_D$).
5. الجسيمات تصبح حيادية على سطح المسبار.

6. المسبار يكون غير باعث وغير عاكس للشحن، لهذا من الضروري إختيار المعادن المشكلة للجزء النشط من المسبار بحيث تكون ذات الخصائص التالية:

- يكون معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي ضعيفاً.
- درجة إنصهار المعدن عالية.
- مقاومًا للرش عند القذف الأيوني.
- مقاومًا للهجمات الكيميائية.

تتوفر هذه الشروط في المعادن التالية: تنغستان (W) ، تانتالوم (Ta)، بلاتين (Pt) ...

5.4.1.II. تحديد الخصائص الكهربائية للبلازما:

أ- كمون البلازما:

يمكن تحديد كمون البلازما V_p بطريقة بيانية أو بطريقة حسابية:

الطريقة البيانية:

كمون البلازما هو الكمون الذي يوافق نقطة إنعطاف المميز $I_s(V_s)$ في سلم ديكارتي. أو نقطة تقاطع خط تقارب المنطقة الانتقالية وخط تقارب منطقة التشبع الإلكتروني في سلم نصف لوغاريتمي ($\ln I_s$) (الشكل II-3).

الطريقة الحسابية:

كمون البلازما هو الكمون الذي ينعدم عنده المشتق الثاني لمعادلة تيار المسبار بالنسبة لكمون المسبار للمنطقة الثانية.

ب- الكمون العائم:

الكمون العائم V_f هو الكمون الذي ينعدم عنده تيار التجميع للمسبار ($I_s=0$)، أو يحدد مباشرة بيانيا بالنقطة التي يمر فيها منحنى المميز تيار-جهد من الصفر.

ج- درجة الحرارة الإلكترونية:

من أجل تحديد هذه الخاصية نرسم في سلم نصف لوغاريتمي الجزء الأسي للمميز (المنطقة الثانية)، وتكتب العبارة اللوغارتمية للمعادلة (II-7) بالصيغة التالية [39]:

$$\ln|I_e| = \frac{eV_s}{K_B T_e} + C \quad (\text{II-8})$$

ميل هذا المستقيم P هو مقلوب درجة الحرارة الإلكترونية T_e أي:

$$P = \frac{\Delta \ln|I_e|}{\Delta V_s} = \frac{1}{K_B T_e} \quad (\text{II-9})$$

وتحدد أيضا إنطلاقا من معرفتنا لكمون البلازما والكمون العائم بالعلاقة التالية [40]:

$$V_p - V_f = \frac{K_B T_e}{2e} \ln \left(\frac{m_i}{1.571 m_e} \right) \quad (\text{II-10})$$

د- الكثافة الإلكترونية:

في منطقة التشبع الإلكتروني، وعندما نبتعد كفاية عن V_p بحيث تصبح

$$\left(\frac{V_s - V_p}{K_B T_e} \gg 1 \right) \text{ فإن:}$$

$$1 - \frac{e(V_s - V_p)}{K_B T_e} \sim V_s \quad (\text{II-11})$$

برسم الدالة $I_s^2(V_s)$ ، نحصل على مستقيم، ميله يتناسب مع n_e^2

وتحدد أيضا إنطلاق من معرفتنا لقيمة درجة الحرارة الإلكترونية وقيمة تيار المسبار عند كمون البلازما [3].

هـ- الكثافة الأيونية :

تحدد الكثافة الأيونية في منطقة التشبع الأيوني، بنفس الطريقة المستعملة لتحديد الكثافة الإلكترونية.

2.II. نمذجة بلازما:

التحديد الرياضي للخصائص الكهربائية للبلازما تتمثل في نمذجة البلازما؛ إذ سنتطرق بصفة عامة إلى النموذج المجهرى، النموذج الهجين وبصفة أكثر تفصيلاً لنموذج الموائع موضوع بحثنا هذا.

1.2.II. نموذج الموائع:

في هذا النموذج نستعمل المقادير المتوسطة للجسيمات المشحونة: الكثافة، السرعة المتوسطة، الطاقة المتوسطة. إن حساب هذه المقادير المتوسطة مرتبط بالعزوم الثلاثة لمعادلة بولتزمان حيث ترتبط الكثافة بمعادلة الاستمرارية، السرعة المتوسطة بمعادلة حفظ كمية الحركة، بينما الطاقة المتوسطة للإلكترون بمعادلة حفظ الطاقة [41].

هذه المعادلات منبثقة من معادلات الموائع لهذا سمي هذا النموذج بنموذج الموائع.

معادلة الإستمرارية:

وهي التعبير الرياضي عن قانون إنحفاظ الشحنة، ويمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla n \langle \vec{v} \rangle = S \quad (\text{II-12})$$

علماً أن:

$$S = R_c - R_i \quad (\text{II-13})$$

$$R_c = n_e v_i(r, t) \quad (\text{II-14})$$

$$R_i = v_a(r, t) n_e + v_r(r, t) n_e \quad (\text{II-15})$$

حيث: n : كثافة الجسيمات المشحونة (الإلكترونات و الأيونات الموجبة أو السالبة)، S عبارة المصدر لمعادلة الإستمرارية، R_c قيمة إنشاء الشحن (التأين)، R_i قيمة ضياع الشحن (الإلتصاق و إعادة الإلتحام)، v_i تردد التأين، v_a تردد الإلتصاق، v_r تردد إعادة الإلتحام.

معادلة تحويل كمية الحركة: و تكتب بالشكل التالي:

$$\frac{\partial nm \langle \vec{V} \rangle}{\partial t} + \vec{\nabla} (nm \langle \vec{V} \vec{V} \rangle) + \vec{\nabla} P - n \vec{F} = R_m \quad (\text{II-16})$$

$$R_m = -mn \langle V v_m \rangle \quad (\text{II-17})$$

حيث: \vec{F} : القوة الخارجية الناشئة عن الحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي، P تنسور الضغط، R_m كمية الحركة الضائعة بفعل التصادمات، v_m تردد تحويل كمية الحركة.

معادلة الطاقة: وتصاغ رياضياً بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial nm \langle \vec{V}^2 \rangle}{2 \partial t} + \vec{\nabla} (nm \langle \vec{V}^2 \vec{V} \rangle / 2) - n \vec{F} \vec{V} = R_{en} \quad (\text{II-18})$$

حيث: R_{en} : الطاقة الضائعة بفعل التصادمات.

معادلة بواسون:

التعبير الرياضي عن تغير الحقل الكهربائي بدلالة شحن الفضاء يصاغ بمعادلة بواسون الشهيرة (المعادلة الأولى لماكسويل):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{II-19})$$

حيث: ρ : الكثافة الشحنة.

المعادلات الثلاثة (الإستمرارية (II-12)، تحويل كمية الحركة (II-16) والطاقة (II-18)) مكملة بمعادلة بواسون (II-19) تسمح لنا بمعالجة بلازما بطريقة أكثر سهولة بإعتبارها مائعاً متجانساً يتميز بمقادير متوسطة.

2.2.II. النموذج المجهري:

حيث أنه لا يمكن معالجة البلازما معالجة عينية، ذلك أنها تشمل على ظواهر تحدث على سلم صغير جدا من الأطوال، وتتناول عددا ضخما من الجسيمات، فإنه يتعين معالجتها إحصائياً.

كثيرا ما يتم في النموذج المجهري حساب دوال التوزيع وخاصة دالة توزيع السرعات التي تعبر فيزيائياً عن ظاهرة الانتقال الإلكتروني والأيوني داخل البلازما، إذ يتطلب حسابها الحل التزامني لمعادلتي بولتزمان و بواسون. لحل هاتين الأخيرتين يلزمنا طريقة عددية عملية وأكثر سرعة ألا و هي الطريقة المجهرية [42].

كشرح بسيط لهذه الطريقة نعتبر عددا محدودا من الجسيمات (غالباً آلاف أو مئات الآلاف) والذي نعتبره ممثلاً لمجموع الإلكترونات والأيونات. كل ما نحل معادلة بواسون في مجال زمني منتظم، نتبع المسارات الخاصة لكل جسيم في الفضاء الطوري. حركة الجسيمات في هذا الفضاء تعود من جهة، إلى الحقل الكهربائي (نكامل المعادلات الكلاسيكية للحركة بين تصادمين) ومن جهة أخرى للتصادمات المعالجة بطريقة إحصائية (حسب طريقة مونتي كارلو) نستخرج العدد العشوائي بحيث تكون كثافات الاحتمال مرتبطة بالمقاطع الفعالة للتصادم، من أجل تحديد لحظة التصادم، طبيعة التصادم، الانحراف الزاوي للجسيم، ...

يتطلب هذا التقريب فترة زمنية معتبرة للحساب. على سبيل المثال، من أجل بلازما ذات 10^8 إلى 10^9 إلكترون/سم³، زمن الحساب اللازم من أجل الوصول إلى الحالة المستقرة للتفريغ RF أطول بـ 10 إلى 100 مرة من زمن حساب نموذج الموائع [42].

II.3.2. النموذج الهجين:

حساب معاملات التأين، الالتصاق، الحركية والانتشار لجسيمات البلازما في نموذج الموائع يكون عملياً صعباً، لذا يتعين علينا إيجاد نموذج أكثر سلاسة ألا وهو النموذج الهجين؛ وهو عبارة عن تزاوج بين طريقة مونتي كارلو و نموذج الموائع. لمعالجة البلازما بهذا النموذج يتعين علينا تقسيمها إلى منطقتين:

- **منطقة غمد البلازما:** في هذه المنطقة تكون الإلكترونات سريعة جدا حيث يمكن تشبيهها بالحزمة الأحادية الحركة مسببة في ذلك تدرجاً كبيراً للحقل الكهربائي الساكن. هذه المنطقة تعالج رياضياً بطريقة مونتي كارلو.
- **منطقة قلب البلازما (جسم البلازما):** الإلكترونات في هذه المنطقة ناتجة عن تأين الذرات و تكون حركتها بطيئة جدا. في هذه الحالة الإلكترونات ما هي إلا جسيمات مشحونة، تعالج رياضياً بنموذج الموائع. إضافة إلى أن الحقل الكهربائي الساكن يكون معدوماً أو يأخذ قيمة ثابتة داخل هذه المنطقة.

هذا النموذج له ميزة إذ أنه يعطي عبارة مصدر تحقق زمن حساب أقل منه في النموذج المجهرى.

طور كل من M. Dalvie et al. [43] النموذج الهجين الأحادي البعد بينما طور A. Bagaerts et al. [44] النموذج الثنائي البعد

II.4.2. أساسيات نموذج الموائع:

إخترنا في عملنا هذا نموذج الموائع لسببين هما:

- أولاً: يسمح لنا هذا النموذج بحساب توزيع الحقل الكهربائي و الكثافة والطاقة لكل صنف من الجسيمات داخل البلازما، وكذا تأثير العوامل الماكروسكوبية عليها (ضغط، الجهد المطبق...)
- ثانياً: لأنه عبارة عن جملة معادلات تفاضلية للاشتقاق الجزئية يمكن حلها بطرق عديدة مختلفة: الفروق المنتهية، العناصر المنتهية و الحجم المنتهية.

II.1.4.2. تقريبات نموذج الموائع:

كأي نموذج علمي يستند نموذج الموائع إلى تقريبات تعتمد على فرضيات فيزيائية تتعلق بالظواهر المدروسة:

- نعتبر دالة التوزيع مشكلة من مجموع دوال أساسية مضافة إلى دالة ماكسويل للتعبير عن إختلاف خصائص الوسط. إذا إعتبرنا أن إختلاف الخصائص هذا ليس معتبراً يمكننا كتابة شعاع النقل الحراري على الشكل التالي [45]:

$$\vec{Q} = K\vec{\nabla}T$$

K : الناقلية الحرارية للجسيمات المعتبرة؛ حسب النظرية الحركية تعطى بـ:

$$K = \frac{3nD}{2}$$

D : معامل الإنتشار وهو مقدار سلمي.

- نعتبر طاقة الإنجراف الناتجة عن تسارع الحقل الكهربائي مهمة أمام طاقة التحريض الحراري. هذه الفرضية صالحة في حالة الحقول الضعيفة. من البديهي في الغمد أين يكون الحقل قويا، وتصبح هذه الفرضية غير كافية.
- نعتبر تنسور الضغط الحركي موحد الخواص مما يجعله قيمة سلمية.

بالإعتماد على هذه الفرضيات تكتب المعادلتين (II-16) و (II-18) على الشكل التالي:

معادلة كمية الحركة: وتصاغ رياضياً بالعلاقة التالية:

$$\vec{J}_s = n_s \langle \vec{V}_s \rangle = -\vec{\nabla} n_s D_s \pm n_s \mu_s \vec{E} \quad (\text{II-20})$$

حيث: s تمثل نوع الجسيم المشحون؛ $s = e$ من أجل الإلكترون و $s = i$ من أجل الأيون، \vec{J}_s : كثافة تدفق الجسيمات المشحونة، n_s كثافة الجسيمات المشحونة، D_s معامل إنتشار الجسيمات المشحونة، μ_s معامل حركية الجسيمات المشحونة.

معادلة الطاقة: و تكتب بالشكل التالي:

$$\frac{\partial nE}{\partial t} + \vec{\nabla} \vec{q} - n \vec{F} \vec{V} = R_{en} \quad (\text{II-21})$$

\vec{q} : شعاع التدفق الكلي، E الطاقة الكلية.

II.2.4.2. معاملات الانتقال في وجود الحقل المغناطيسي:

1. ظاهرة الانتقال:

نتيجة للحركة العشوائية للجسيمات المشحونة والحيادية و نتيجة للتصادمات التي تحدث بينها، فإن سرعات الجسيمات المشحونة والحيادية (بالتالي طاقتها) تتغير تبعا لذلك. فإن كان هناك عدم تجانس ما في توزيع الكثافة في حجم البلازما، أو عدم تجانس في سرعة الحركة الإنسحابية، فإنه علاوة على الحركة العشوائية تنشأ في البلازما حركة منظمة للجسيمات تؤدي إلى تسوية عدم التجانس هذا و إلى إنتظام خواص البلازما، أي تنشأ ما يسمى بطواهر الإنتقال في البلازما، نذكر منها الحركية و الإنتشار. فهي تتلخص في أنه يظهر في البلازما إنتقالا منظم وموجه للكتلة (الانتشار) أو لسرعة الحركة (الحركية) [20].

عند إضافة الحقل المغناطيسي للبلازما فإن الجسيمات المشحونة تخضع سرعتها إلى العبارة التالية [46]:

$$\vec{V}_s = \frac{q_s}{v_m m_s} (\vec{E} + \vec{V}_s \times \vec{B} + K_B T_s \frac{\vec{V} n_s}{n_s}) \quad (\text{II-22})$$

q_s : شحنة الجسيمات المشحونة.

الحل الخاص لهذه المعادلة هو عبارة عن مجموع حلين يتم الحصول عليهما بشكل منفصل كما يلي:

الحل الأول: إعتبار سرعة الجسيم ناتجة عن الحقل الكهربائي فقط (سرعة إنسحابية فقط)؛ أي: $\vec{E} \neq 0$ و $\vec{V} n_s = 0$

الحل الثاني: إعتبار سرعة الجسيم ناتجة عن الإنتشار فقط؛ أي: $\vec{E} = 0$ و $\vec{V} n_s \neq 0$.

2. معامل الحركية:

عند وجود الغاز تحت تأثير مجال كهربائي تتحرك الإلكترونات حركة إنسحابية تحت تأثير هذا المجال وفي إتجاه معاكس لإتجاهه. كما تتحرك الأيونات الموجبة حركة إنسحابية كذلك ولكن في إتجاه المجال [47]. تتميز هاتان الحركتان الإنسحابتان للإلكترونات و الأيونات بمعاملين وهما على التوالي الحركية الإلكترونية μ_e و الحركية الأيونية μ_i . كتعريف بسيط للحركية هي القدرة التي تبديها الجسيمات للتنقل (الحركة).

يمكننا إعادة كتابة العلاقة (II-22) بالعبارة التالية

$$\vec{V}_s - \frac{q_s}{v_m m_s} (\vec{V}_s \times \vec{B}) = \frac{q_s}{v_m m_s} (\vec{E} + K_B T_s \frac{\vec{V} n_s}{n_s}) \quad (\text{II-23})$$

نعتبر الحقل المغناطيسي $\vec{B} (0,0,B_z)$ و الحقل الكهربائي $\vec{E} (E_x, E_y, E_z)$

كما ذكرنا سابقا الحركية تكون بسبب الحركة الإنسحابية الناتجة عن الحقل الكهربائي بالتالي سنعتبر الحل الأول للمعادلة (II-23) ومنه تكتب عبارة السرعة كما يلي [46]:

$$V_{sx} = \frac{q_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} E_x + \frac{q_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} E_y$$

$$V_{sy} = -\frac{q_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} E_x + \frac{q_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} E_y$$

$$V_{sz} = \frac{q_s}{m_s v_m} E_z$$

لدينا:

$$\vec{V}_s = \bar{\mu}_s \vec{E} \quad (\text{II-24})$$

ومنه تنسور الحركية للجسيم المشحون يكتب بالشكل التالي:

$$\bar{\mu}_s = \begin{pmatrix} \mu_s^{\parallel} & \mu_s^{\perp} & 0 \\ -\mu_s^{\perp} & \mu_s^{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_s \end{pmatrix} \quad (\text{II-25})$$

حيث:

$$\mu_s^{\parallel} = \frac{q_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} \quad \mu_s^{\perp} = \frac{q_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} \quad \mu_s = \frac{q_s}{m_s v_m}$$

$$\omega_c = \frac{q_s B_z}{m_s}$$

ω_c : تردد سيكلوترون للجسيم المشحون.

3. معامل الانتشار:

ظاهرة الانتشار تطلق على عملية تسوية التوزيع الإتراني للتركيز داخل البلازما. تتميز هذه الظاهرة بمعامل يسمى معامل الانتشار وهو على نوعين معامل الانتشار الإلكتروني D_e و معامل الانتشار الأيوني D_i [20].

من أجل إيجاد معامل الانتشار سنعتبر الحل الثاني للمعادلة (II-23) ومنه تكتب عبارة السرعة كما يلي [46]:

$$V_{sx} = -\frac{k_B T_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial x} - \frac{k_B T_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial y}$$

$$V_{sy} = \frac{k_B T_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial x} - \frac{k_B T_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial y}$$

$$V_{sz} = -\frac{k_B T_s}{m_s v_m} \frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial z}$$

لدينا:

$$\vec{V}_s = -\bar{D}_s \frac{\vec{\nabla} n_s}{n_s} \quad (\text{II-26})$$

ومنه تنسور الانتشار للجسيم المشحون يكتب بالشكل التالي:

$$\bar{D}_s = \begin{pmatrix} D_s^{\parallel} & D_s^{\perp} & 0 \\ -D_s^{\perp} & D_s^{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & D_s \end{pmatrix} \quad (\text{II-27})$$

حيث:

$$D_s^{\parallel} = \frac{k_B T_s}{m_s} \frac{v_m}{v_m^2 + \omega_c^2} \quad D_s^{\perp} = \frac{k_B T_s}{m_s} \frac{\omega_c}{v_m^2 + \omega_c^2} \quad D_s = \frac{k_B T_s}{m_s v_m}$$

ومنه حل المعادلة (II-23) لسرعة الجسيم المشحون هو الجمع بين المعادلة (II-24) و (II-26)

$$\vec{V}_s = \bar{\mu}_s \vec{E} - \bar{D}_s \frac{\vec{\nabla} n_s}{n_s} \quad (\text{II-28})$$

إن النسبة بين معامل الحركة ومعامل الإنتشار تسمى بعلاقة أنشتاين وتسمى أيضا بالطاقة المميزة و تكتب بالصيغة التالية:

$$\frac{D_s}{\mu_s} = \frac{K_B T_s}{e} \quad (\text{II-29})$$

حيث قيمتها بالنسبة للأيونات تتراوح بين 0.025 eV [24] و 0.039 eV [48] أما بالنسبة للإلكترونات فإنها تأخذ قيماً مختلفة نذكر منها 1 eV حسب كل من T. Callegari [48] و C. Pedoussat [24]، 2 eV حسب C. Punset [49].

الفصل الثالث

الفصل الثالث

تطبيق نموذج الموائع على بلازما مغناطيسية لنظام *RF 13.56 MHz*

بعد الدراسة التوثيقية التي تمت في الفصل الثاني، حيث تطرقنا خلالها لتشخيص البلازما للتحديد التجريبي لخصائصها الكهربائية، وبعد التعرض أيضا إلى نمذجة البلازما للتحديد الرياضي لنفس الخصائص. في هذا الفصل سنقوم بتطبيق وتطوير نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن لبعده واحد على البلازما المغناطيسية لنظام $RF13.56MHz$ ، ثم نتطرق إلى طريقة النموذج العددي المستعملة لحل معادلاته وكذا الصيغة الأسية المستعملة لعبارة تدفق الكثافة ودرجة الحرارة الإلكترونية، ونقدم أيضا الطريقة التكرارية بإستعمال خوارزمية توماس، وفي الأخير نعطي لمحة عن كيفية إيجاد المميز تيار-جهد لمسبار لانجوير باستخدام النتائج المتحصل عليها من نموذج الموائع وهذا حسب شكل المسبار، ثم نعرض أيضا مخطط الحساب.

1.III. مقدمة:

عملنا في هذه الرسالة هو تكملة لسلسلة البحوث الجارية لفريق بحثنا، والقائمة حول دراسة الخصائص الكهربائية لبلازما أرغون المستعملة في الرش المهبطي المغنطوني المغذى بنظام التيار المتناوب المذياعي RF بإستعمال نموذج الموائع لنظام مستقر، حيث تم العمل على: أحادي البعد [50] وثلاثي البعد [51]، وتمت الدراسة أيضا في إنعدام الحقل المغنطيسي ولبعد واحد بالصيغة الأسية لعبارة التدفق [52] ولمزيج غازي (بلازما أرغون وأكسجين) [53] [54] وفيما تم التحديد العددي للمميز تيار-جهد لمسبار لانجمير بإستخدام نتائج نموذج الموائع [39].

في هذا العمل سنقوم بتطوير نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد على بلازما الأرغون، حيث سنعتبر الحركية الإلكترونية متعلقة بالحقل المغنطيسي ومعامل الانتشار الإلكتروني مرتبط وفق علاقة أنشتاين بدرجة الحرارة الإلكترونية المتغيرة، فيما سنستخدم الصيغة الأسية لعبارة التدفق [55].

2.III. النموذج الرياضي:

أشرنا في الفصل السابق إلى نموذج الموائع الذي يسمح لنا بدراسة الخصائص الفيزيائية الكهربائية وكذا إنتقال الجسيمات المشحونة داخل وسط البلازما، حيث تشتق معادلات نموذج الموائع من معادلات عزوم بولتزمان: معادلة الإستمرارية لكل جسيم مشحون (III-1)، معادلة الطاقة (III-2) (خاص فقط بالإلكترونات) مكملة بمعادلة بواسون (III-3) تسمح لنا هذه المعادلات الثلاث بحساب الكثافة الإلكترونية والأيونية، الطاقة الإلكترونية (درجة الحرارة الإلكترونية) والحقل الكهربائي وغيرها من الخصائص.

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_s = S^i \quad (III-1)$$

$$\frac{\partial n_e \epsilon_e}{\partial t} + \frac{5}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{e\epsilon} = S^{e\epsilon} = -e \vec{J}_e \cdot \vec{E} + e \phi^i S^i + e \phi^x S^x \quad (III-2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\Delta V = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (III-3)$$

حيث: S^i عبارة المصدر لمعادلة الإستمرارية الناتجة عن التأين فقط، ε_e طاقة الإلكترون، \vec{J}_{ee} تدفق طاقة الإلكترون، S^{ee} عبارة المصدر لمعادلة الطاقة، S^x عبارة المصدر لمعادلة الطاقة الناتجة عن الإثارة، ϕ^i و ϕ^x طاقة التأين والإثارة على التوالي، V الكمون الكهربائي.

يتم حساب التدفق إنطلاقاً من معادلة الإنتقال الناتجة عن إنتشار وإنتقال الجسيمات المشحونة داخل الحقل الكهربائي. معادلة (III-4) و (III-5) توضح معادلة التدفق وعلاقة أنشتاين لمعامل الإنتشار على التوالي [8]:

$$\vec{J}_s = \mp \bar{\mu}_s n_s \vec{E} - \frac{\bar{\mu}_s}{e} \vec{\nabla} n_s k_B T_s \quad (III-4)$$

$$\bar{D}_s = \frac{k_B T_s}{e} \bar{\mu}_s \quad (III-5)$$

حيث: الرمز (+) للأيونات الموجبة و (-) للألكترونات

تكتب عبارة التأين و الإثارة حسب M. Dalvie بالعلاقة التالية [13]:

$$S^{i,x} = k^{i,x} n_e \exp\left(-\frac{e\phi^{i,x}}{k_B T_e}\right) \quad (III-6)$$

مع العلم أن: $k^{i,x}$ ثابت

تعطى عبارة الطاقة الحرارية الإلكترونية بالصيغة $\varepsilon_e = \frac{3}{2} K_B T_e$ فيما عبارة تدفق الطاقة الإلكترونية $\vec{J}_{ee} = \vec{J}_e \varepsilon_e$

3.III. تطبيق نموذج الموانع على بلازما الأروغون:

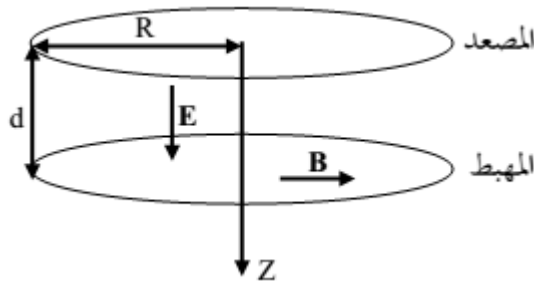
في عملنا هذا نقوم بتطبيق نموذج الموانع لبعده واحد مرتبط بالزمن على بلازما الأروغون المستعمل في جهاز الرش المهبطي المغنطروني المغدى بفرق جهد متناوب نو تردد مذياعي RF قدره 13.56 MHz.

من ضمن الأهداف المنشودة لهذا البحث، تطوير نموذج الموائع لبعدها واحد مرتبط بالزمن، حيث سنقوم بإعتبار الحركية الإلكترونية وعلاقة أنشتاين لمعامل الانتشار الإلكتروني في وجود الحقل المغنطيسي، وهذا إضافة إلى ما قدمه كل من Y. Lin et al. [14،9]، A. Bouchikhi et al. [11،10] و M.Dalvie et al. [13] في أعمالهم. وبما أن البعد الوحيد الذي يعبر عن التغير الموضعي بصورة شاملة (من المهبط إلى المصعد) لمقادير الفيزيائية هو البعد Z للمحور الفاصل بين اللبوسين، فإن جميع المقادير تكتب وفقا لهذا البعد.

نظرا لوجود الحقل المغنطيسي فإن مسار حركة الإلكترونات يتغير وتخضع سرعتها إلى العبارة التالية [46].

$$\vec{V}_e = \frac{e}{v_e m_e} (\vec{E} + \vec{V}_e \times \vec{B} - K_B T_e \frac{\vec{\nabla} n_e}{n_e}) \quad (\text{III-7})$$

وبإعتبار الحقل المغنطيسي موازي لسطح المهبط $\vec{B}(B_r, 0, 0)$ والحقل الكهربائي عمودي عليه $\vec{E}(0, 0, E_z)$ الشكل (1-III)، حيث E_z قيمة الحقل الكهربائي و B_r قيمة الحقل المغنطيسي والتي نعتبرها ثابتة داخل الغمد المهبطي، d البعد بين القطبين والذي نعتبره أقل بكثير من R نصف قطر اللبوسين.



الشكل (1-III): رسم توضيحي لهندسة جهاز الرش المهبطي المغنطوني.

ومنه يكتب تنسور الحركة الإلكتروني بالشكل التالي:

$$\bar{\mu}_e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_e^\perp \\ 0 & 0 & \mu_e^\parallel \end{pmatrix}$$

حيث:

$$\mu_e^\perp = \frac{e}{m_e} \frac{\omega_r}{\nu^2 + \omega_r^2} \quad \mu_e^\parallel = \frac{e}{m_e} \frac{\nu}{\nu^2 + \omega_r^2} \quad \omega_r = \frac{eB_r}{m_e}$$

ν تردد نقل عزم الإلكترون، ω_r تردد سيكلوترون الإلكترون.

كون الكتلة الأيونية كبيرة جدا مقارنة بالكتلة الإلكترونية يجعل الحركة الأيونية لا تتأثر بالحقل المغناطيسي [5]. $\bar{\mu}_i = \mu_i$.

قبل التطرق بشكل تفصيلي لحل المعادلات ندون في الجدول (1-III) أهم المعاملات والثوابت الفيزيائية المستعملة لغاز الأرجون.

الجدول (1-III): الثوابت الفيزيائية المستعملة لغاز الأرجون [5،13].

الرمز	القيمة
d	3cm
f	13.56 MHz
ν	$6 \times 10^9 P_g s^{-1} \text{Torr}^{-1}$
μ_i	$15 \times 10^2 / P_g \text{ cm}^2 \text{ Torr}$
T_i	0.04eV
k^i	$2 \times 10^9 s^{-1}$
k^x	$1 \times 10^9 s^{-1}$
ϕ^i	16V
ϕ^x	12 V

حيث: P_g ضغط الغاز (Torr).

4.III. النموذج العددي:

إن الحل التحليلي لجملة معادلات تفاضلية لنموذج الموائع بغرض إيجاد الصيغة الرياضية للمقادير الفيزيائية يكون عملياً صعباً، لهذا نلجأ إلى الطرق العددية التي تهدف إلى إيجاد قيمة المقادير الفيزيائية عند كل نقطة من الفضاء وعند كل لحظة زمنية. من الطرق العددية نذكر الفروق المنتهية، الحجوم المنتهية والعناصر المنتهية.

إخترنا في عملنا هذا للحل العددي طريقة الحجوم المنتهية؛ حيث يمكننا إعادة كتابة معادلة الإستمرارية ومعادلة الطاقة بالشكل العام التالي [55]:

$$\alpha \frac{\partial n}{\partial t} + \beta \frac{\partial J_z}{\partial z} = S \quad (\text{III-8})$$

فيما معادلة التدفق الجسيمات والطاقة الإلكترونية تكتب عموماً كمايلي:

$$J_z = \mp \mu_s n E_z - \frac{\mu_s}{e} \frac{\partial}{\partial z} (nk_B T_s) \quad (\text{III-9})$$

علماً أن: n ، كثافة وتدفق الجسيمات المشحونة على التوالي، α و β ثوابت و S عبارة المصدر.

من أجل الإلكترونات:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 1, \quad J_z = J_{ez}, \quad n = n_e, \quad S = S^i, \quad \mu_s = \mu_e^{\parallel}$$

من أجل الأيونات:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 1, \quad J_z = J_{iz}, \quad n = n_i, \quad S = S^i, \quad \mu_s = \mu_i$$

من أجل الطاقة الإلكترونية:

$$\alpha = \frac{3}{2}, \quad \beta = \frac{5}{2}, \quad J_z = J_{e\epsilon z}, \quad n = n_e k_B T_e, \quad S = S^{e\epsilon}, \quad \mu_s = \mu_e^{\parallel}$$

بعد تطبيق تعريف المشتقات الجزئية حسب طريقة الحجوم المنتهية (k من أجل الزمن و z من أجل الموضع)، تصاغ المعادلتين التفاضليتين (III-3) و (III-8) كما يلي:

$$\alpha \Delta z \left(\frac{n_j^{k+1} - n_j^k}{\Delta t} \right) + \beta (J_{zj+1/2}^{k+1} - J_{zj-1/2}^{k+1}) = \Delta z S_j^k \quad (\text{III-10})$$

$$\frac{V_{j+1}^k - 2V_j^k + V_{j-1}^k}{\Delta z} = \Delta z \left[\frac{-e}{\epsilon_0} (n_{ij}^k - n_{ej}^k) \right] \quad (\text{III-11})$$

الصيغة الأسية لعبارة تدفق الجسيمات (معادلة (III-9)) تكون على النحو التالي [56،57]:

$$J_{zj+1/2}^{k+1} = \frac{Z_1 k_B}{\Delta z e} \left(\frac{\mu_{sj+1}^k T_{sj+1}^k n_{j+1}^{k+1} - \mu_{sj}^k T_j^k n_j^{k+1} \exp Z_1}{1 - \exp Z_1} \right) \quad (\text{III-12})$$

$$J_{zj-1/2}^{k+1} = \frac{Z_2 k_B}{\Delta z e} \left(\frac{\mu_{sj}^k T_{sj}^k n_j^{k+1} - \mu_{sj-1}^k T_{j-1}^k n_{j-1}^{k+1} \exp Z_2}{1 - \exp Z_2} \right) \quad (\text{III-13})$$

حيث:

$$Z_1 = \mp \frac{2 e}{k_B} \frac{\Delta z E_{j+1/2}^k}{(T_{sj+1}^k + T_{sj}^k)} = \mp \frac{2 e}{k_B} \frac{[-(V_{j+1}^k - V_j^k)]}{(T_{sj+1}^k + T_{sj}^k)}$$

$$Z_2 = \mp \frac{2 e}{k_B} \frac{\Delta z E_{j-1/2}^k}{(T_{sj}^k + T_{sj-1}^k)} = \mp \frac{2 e}{k_B} \frac{[-(V_j^k - V_{j-1}^k)]}{(T_{sj}^k + T_{sj-1}^k)}$$

بعد تعويض المعادلة (III-12) و (III-13) في المعادلة (III-10) نتحصل على المعادلة من الشكل:

$$A_{j-1}n_{j-1}^{k+1} + A_j n_j^{k+1} + A_{j+1}n_{j+1}^{k+1} = B_j \quad (III-14)$$

علما أن :

$$A_{j-1} = \beta \frac{Z_2 k_B}{\Delta z e} \left(\frac{\mu_{sj-1}^k T_{sj-1}^k \exp Z_2}{1 - \exp Z_2} \right)$$

$$A_j = -\frac{\beta k_B}{\Delta z e} \left[Z_1 \left(\frac{\mu_{sj}^k T_j^k \exp Z_1}{1 - \exp Z_1} \right) + Z_2 \left(\frac{\mu_{sj}^k T_{sj}^k}{1 - \exp Z_2} \right) \right] + \frac{\alpha \Delta z}{\Delta t}$$

$$A_{j+1} = \beta \frac{Z_1 k_B}{\Delta z e} \left(\frac{\mu_{sj+1}^k T_{sj+1}^k}{1 - \exp Z_1} \right)$$

$$B_j = \Delta z S_j^k + \frac{\alpha \Delta z}{\Delta t} n_j^k$$

فيما الكمون الكهربائي يكون كما يلي:

$$V_{j+1}^k - 2 V_j^k + V_{j-1}^k = \Delta z^2 \left[\frac{-e}{\epsilon_0} (n_{ij}^k - n_{ej}^k) \right] \quad (III-15)$$

إن الحل التزامني لجملة معادلات نموذج المواع ونظرا لتشكّل نظام ثلاثي الأقطار (المعادلة (III-14) و (III-15)) إختارنا للحل البرمجي الطريقة التكرارية بإستعمال خوارزمية توماس والتي ينص مبدأها على مايلي [58]:

لدينا جملة المعادلات التالية :

$$\begin{cases} b_1x_1 + c_1x_2 = d_1 \\ a_ix_{i-1} + b_ix_i + c_ix_{i+1} = d_i \quad i = 2, \dots, imax - 1 \\ a_{imax}x_{imax-1} + b_{imax}x_{imax} = d_{imax} \end{cases} \quad (III-16)$$

حسب الشروط الحدية تحدد x_1 و x_{imax} ومنه نعرف حسب خوارزمية توماس المقدار α_i و β_i كما يلي:

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{c_i}{b_i} & ; i = 1 \\ \frac{c_i}{b_i - a_i\alpha_{i-1}} & ; i = 2, \dots, imax - 1 \end{cases}$$

$$\beta_i = \begin{cases} \frac{d_i}{b_i} & ; i = 1 \\ \frac{d_i - a_i\beta_{i-1}}{b_i - a_i\alpha_{i-1}} & ; i = 2, \dots, imax \end{cases}$$

ومنه نتحصل على الحل كما يلي:

$$x_{imax} = \beta_{imax}$$

$$x_i = \beta_i - \alpha_ix_{i+1} \quad ; i = imax - 1, \dots, 1$$

5.III. الشروط الحدية والابتدائية:

إعتمدنا في عملنا على الشروط الحدية والابتدائية المدونة في الجدول (III-2).

الجدول (III-2): الشروط الحدية والإبتدائية المستعملة [9-11].

المقدار	الشروط الحدية		الشروط الإبتدائية
	المصعد (z = 0)	المهبط (z = d)	
n_e	0	0	$10^7 + 10^9(1 - z/d)^2(z/d)^2 cm^{-3}$
n_i	$\frac{\partial n_i(t)}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial n_i(t)}{\partial z} = 0$	
T_e	$\frac{\partial T_e(t)}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T_e(t)}{\partial z} = 0$	$T_e = 1eV$
V	0	$V_{RF} \cos 2\pi ft$	/

6.III. حساب قيم المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير:

من ضمن الأهداف المنشودة أيضا لهذا البحث هو حساب قيم المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير ورسمه. و كما رأينا في الفصل السابق أن مسبار لانجمير عبارة عن ناقل معدني صغير الأبعاد، مغمور داخل البلازما، مستقطب كهربائيا بفرق جهد مستمر يسمح بتجميع تيار داخله.

هذا التيار الذي هو عبارة عن جمع جبري للتيارين الأيوني والإلكتروني، حيث يمكن حساب هذين الأخيرين إنطلاقا من نتائج نموذج المواع. بالتالي نصوغ المعادلة الرياضية لتيار المسبار على النحو التالي:

$$I_s(V_s) = I_e(V_s) + I_i(V_s) \quad (\text{III-17})$$

حيث قيمة كل من التيار الإلكتروني و الأيوني تختلف حسب هندسة وشكل المسبار وهي ملخصة في الجدول التالي [59]:

		مسطح	إسطواني	كروي
التيار الإلكتروني	$V_s > V_p$	I_{es}	$I_{es} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{e(V_p - V_s)}{K_B T_e}\right)^{1/2}$	$I_{es} \left(1 - \frac{e(V_p - V_s)}{K_B T_e}\right)$
	$V_s \leq V_p$	$I_{es} \exp \left\{ -e \frac{(V_p - V_s)}{K_B T_e} \right\}$		
حيث: $I_{es} = A_s n_e e \left(\frac{K_B T_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2}$				

		مسطح	إسطواني	كروي
التيار الأيوني	$V_s < V_p$	$-I_{is}$	$-I_{is} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{e(V_p - V_s)}{K_B T_e}\right)^{1/2}$	$-I_{is} \left(1 + \frac{e(V_p - V_s)}{K_B T_e}\right)$
	$V_s \geq V_p$	$-I_{is} \exp \left\{ e \frac{(V_p - V_s)}{K_B T_e} \right\}$		
حيث: $I_{is} = A_s i e \left(\frac{K_B T_e}{2\pi m_i}\right)^{1/2}$				

7.III. مخطط برنامج الحساب :

إن حلنا العددي اليدوي للمعدلات التفاضلية غير كافي للإجابة عن التساؤلات العلمية حول الخصائص الكهربائية للبلازما المغنطرونية، ولا يثمر عملنا هذا أيضا إلا ببرمجة المعدلات آليا، تلبية لذلك إستعملنا برنامج بلغة الفورترن الذي يعتمد مخططه العام على الخطوات التالية:

1. إدخال المعطيات الأولية.
2. الحساب العددي: قبل بدء البرنامج في الحساب العددي نجد أنفسنا أمام خيارين للحساب وهما:

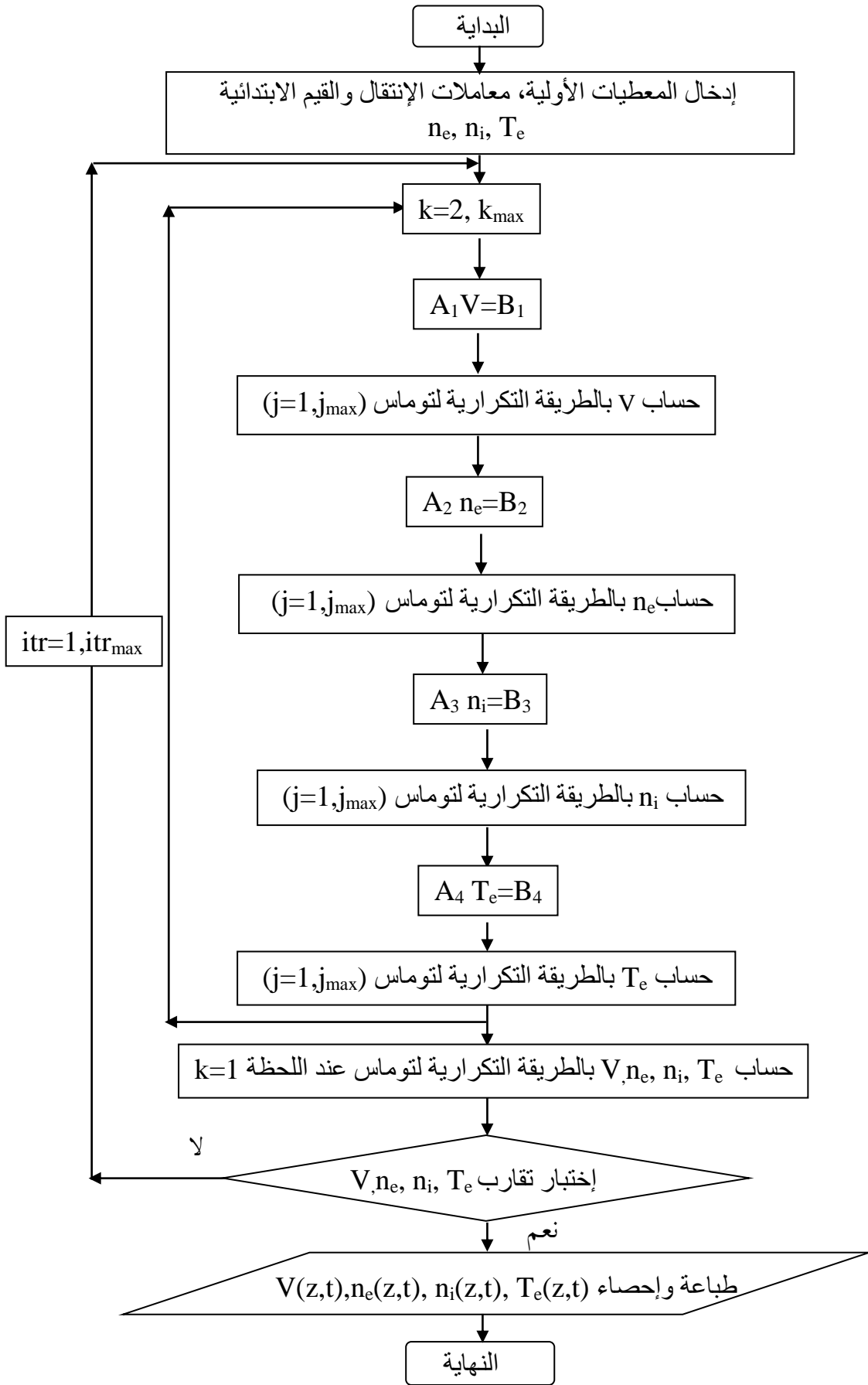
● الإختيار الأول:

1. حساب الكمون الكهربائي، الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية ودرجة الحرارة الإلكترونية. وذلك بإستعمال نموذج المواعع والطريقة التكرارية توماس.
2. طباعة النتائج في جداول خاصة.

● الإختيار الثاني:

1. حساب قيم المميز تيار-جهد وذلك بتطبيق النتائج المتحصل عليها سابقا.
2. طباعة النتائج في جداول خاصة.

يتم الحساب العددي للإختيار الأول ببرنامجنا وفقا للمخطط الموضح بالشكل(III-2).



الشكل (III-2): مخطط سير الحساب العددي حسب الإختيار الأول.

III.8. خلاصة:

تطرقنا في هذا الفصل إلى تطبيق وتطوير نموذج الموائع على بلازما مغناطيسية لنظام RF 13.56 MHz. إستعملنا الطريقة التكرارية توماس لحل جملة معادلات مرتبطة ألا وهي معادلة الإستمرارية، معادلة الطاقة ومعادلة بواسون، كل هذا لأجل حساب الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية بدلالة الموضع والزمن. وقدما الأدوات النظرية والحسابية للمشخص الآلي مسبار لانجمير لإيجاد مميزه تيار-جهد كما قدمنا مخطط بسيط يوضح كيفية سير عمل برنامجنا للحساب العددي.

الفصل الرابع

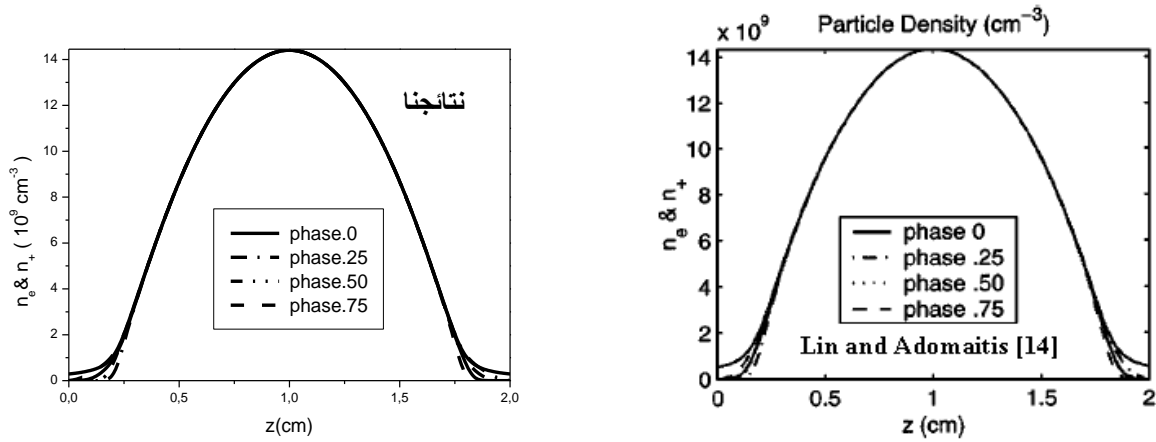
الفصل الرابع

نتائج وتحليل

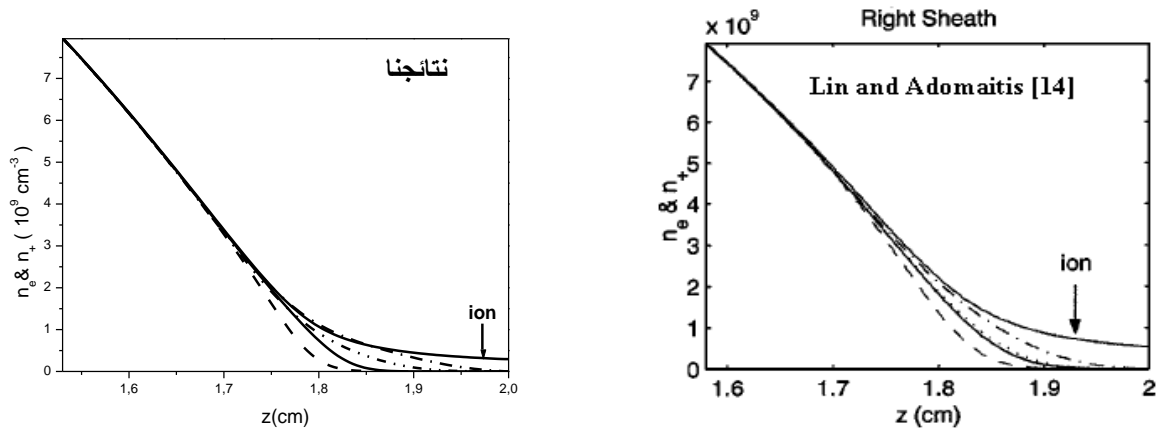
تعتبر دراسة تأثير العوامل الماكروسكوبية على الخصائص الكهربائية للبلازما من أهم الوسائط التي تتحكم في إنتاج الطبقات الرقيقة، بالتالي التحكم في مدى استغلالها في ميدان الصناعة. لهذا السبب ارتأينا أن نقدم في هذا الفصل نتائج تطبيق نموذج الموائع أحادي البعد لنظام مرتبط بالزمن لبلازما الأروغون المستعملة لتوضع الطبقات الرقيقة بالرش المهبطي المغنطروني المغدي بالتيار المتناوب ذو التردد المذياعي $RF\ 13,56\ Mhz$. نعرض بدايةً المقارنة التي أجريناها لنتائجنا مع نتائج باحثين آخرين، ثم نلينا بدراسة تأثير العوامل الماكروسكوبية كالحقل المغناطيسي، ضغط غرفة التفريغ وفرق الجهد المطبق على المهبط. في الأخير كنتنمين لنتائجنا سنقوم بتطبيقها لإيجاد المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير وكذا إستنتاج معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي.

1.IV. حساب الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية في شروط عمل Y. Lin et al. [14]:

عند تطبيقنا لنفس الظروف التجريبية المطبقة من طرف Y. Lin et al. في إنعدام الحقل المغناطيسي وهي: البعد بين اللبوسين $d=2\text{cm}$ ، ضغط غرفة التفريغ $P=1\text{Torr}$ و فرق الجهد المطبق على المهبط $V_{RF}=40\text{V}$ خلال مختلف اللحظات الزمنية لدورة RF $13,56\text{Mhz}$ على برنامجنا بينت لنا النتائج التوافق الكبير لمنحنى الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية الموضح في الشكل (1-IV). حيث المنحنى (أ) يخص وسط البلازما فيما المنحنى (ب) يخص منطقة الغمد المهبطي [14].



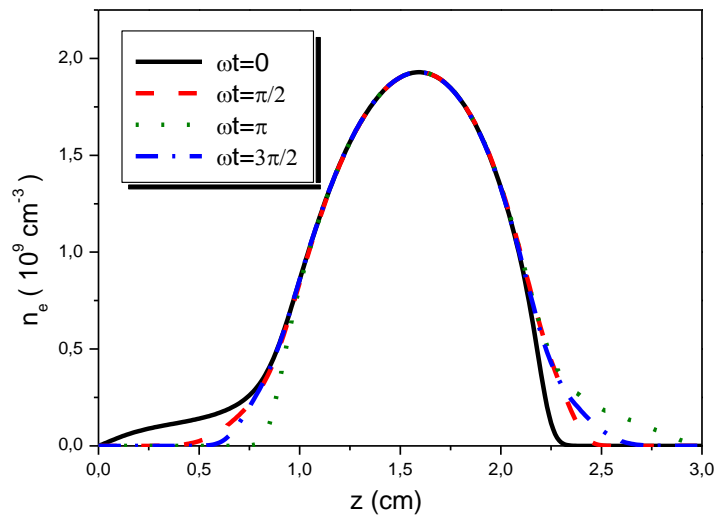
(أ) وسط البلازما.



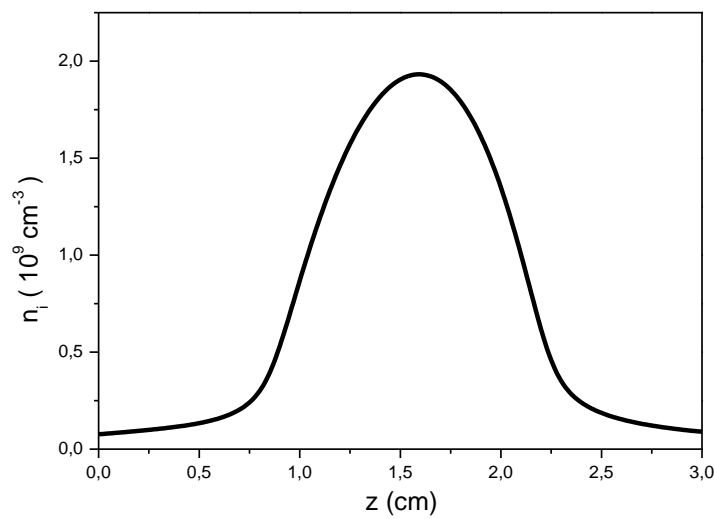
(ب) غمد البلازما.

الشكل (1-IV): مقارنة بين منحنى كثافة الشحنات لنتائجنا بمنحنى Y. Lin et al. : (أ) وسط البلازما و (ب) غمد البلازما [14].

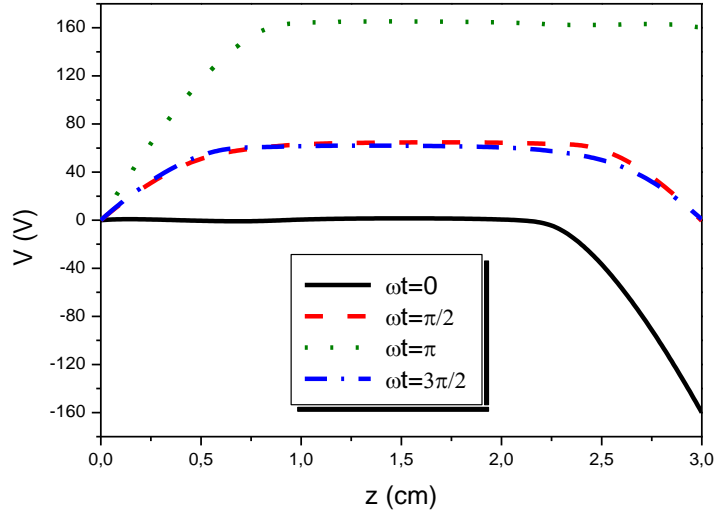
بعد المقارنة التي أجريتها وباعتبار وسط بلازما الأرجون يتكون فقط من إلكترونات وأيونات موجبة Ar^+ قمنا بتطبيق الشروط التجريبية التالية: فرق الجهد المطبق على اللبوس المهبطي $V_{RF} = -160$ V، ضغط غرفة التفريغ $P = 100$ mTorr، شدة الحقل المغناطيسي $B = 30$ G والبعد بين اللبوسين $d = 3$ cm الذي نعتبره صغير أمام قطر اللبوس. النتائج المتحصل عليها للتوزيع الموضعي للخصائص الكهربائية لبلازما الأرجون: الكثافة الإلكترونية والأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية خلال مختلف اللحظات الزمنية لدورة RF 13,56 Mhz موضحة في الأشكال التالية. [55]:



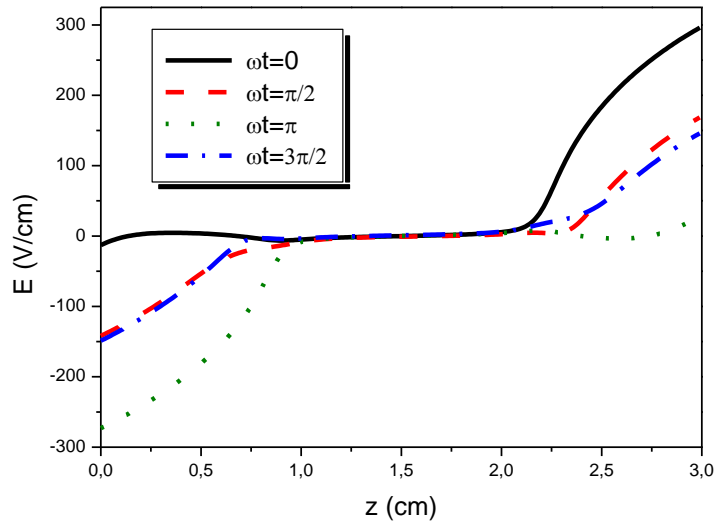
الشكل (2-IV): التغير الموضعي للكثافة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.



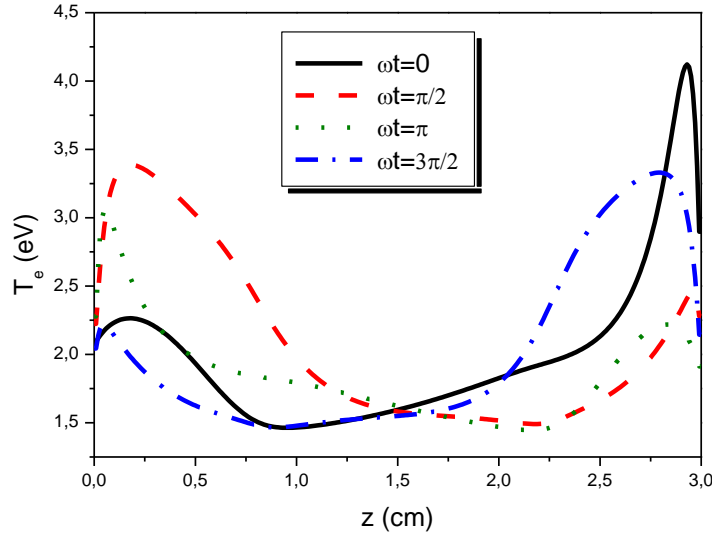
الشكل (3-IV): التغير الموضعي للكثافة الأيونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.



الشكل (4-IV): التغير الموضعي للكمون الكهربائي لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.



الشكل (5-IV): التغير الموضعي للحقل الكهربائي لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.



الشكل (6-IV): التغير الموضعي للدرجة الحرارة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.

نلاحظ من المنحنى الموضح في الشكل (2-IV) أن الكثافة الإلكترونية تزداد تدريجياً كلما إبتعدنا من المصعد إلى أن تستقر عند $1.92 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ وسط البلازما، ثم تتناقص كلما إقتربنا من المهبط. وهو نفس سلوك منحنى الكثافة الأيونية في الشكل (3-IV) إذ تستقر عند نفس القيمة بسبب نزعة التعادل الكهربائي التي تمتلكها البلازما، غير أن الكثافة الأيونية لا تتبع تغير أطوار أزمنة الدور RF $13,56 \text{ Mhz}$ لبطئ حركة الأيونات، في حين الكثافة الإلكترونية لسرعة الإلكترونات وقدرتها على تتبع التردد المذياعي تتأثر بهذه الأزمنة داخل الغمدين. حيث نلاحظ مثلاً في الطور $\omega t=0$ بالقرب من المهبط الإلكترونات معدومة عكس المصعد تتواجد بكثرة، ومع مرور زمن الدورة تتحرك الإلكترونات من الغمد المصعدي إلى غمد المهبطي، هذا ما نلاحظه أيضاً في منتصف الدورة أي الطور $\omega t=\pi$ إذ نعتبره تقريباً الصورة المعاكسة لطور $\omega t=0$.

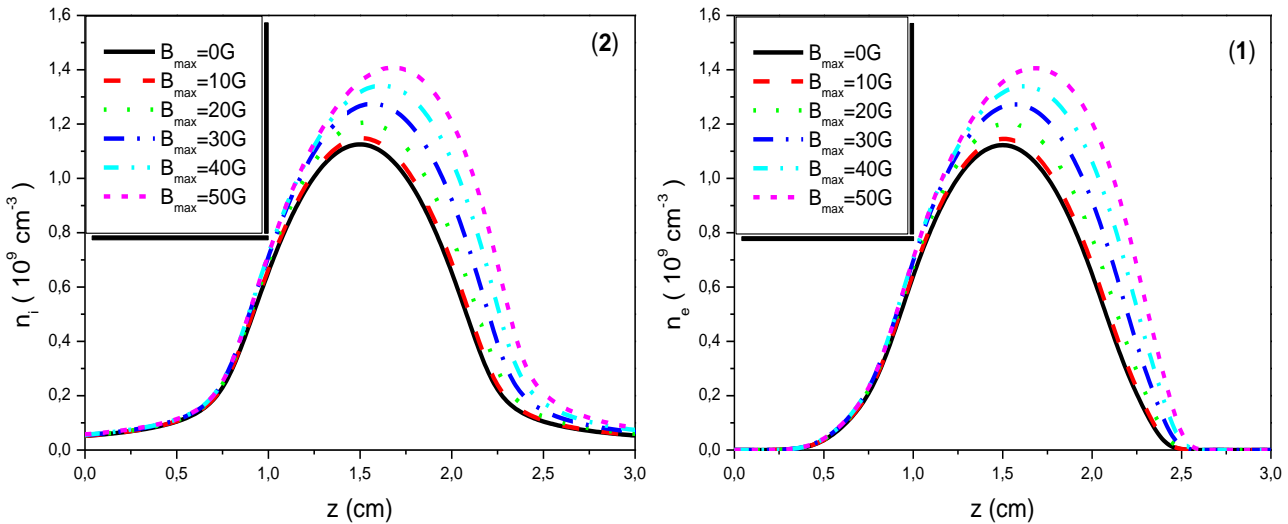
الشكل (4-IV) يوضح منحنى الكمون الكهربائي، حيث الملاحظة العامة التي يمكن أن نقدمها أن الكمون الكهربائي دائماً يأخذ القيمة 0 V عند المصعد بسبب الشروط الحدية ثم يتزايد شيئاً فشيئاً ليأخذ قيمة ثابتة وسط البلازما. تسمى هذه القيم بكمون البلازما وهذا راجع لتساوي قيمة الكثافة الإلكترونية مع قيمة الكثافة الأيونية، ثم يعود ليتناقص من جديد كلما إقتربنا من المهبط ليأخذ مثلاً القيمة -160 V في الطور $\omega t=0$.

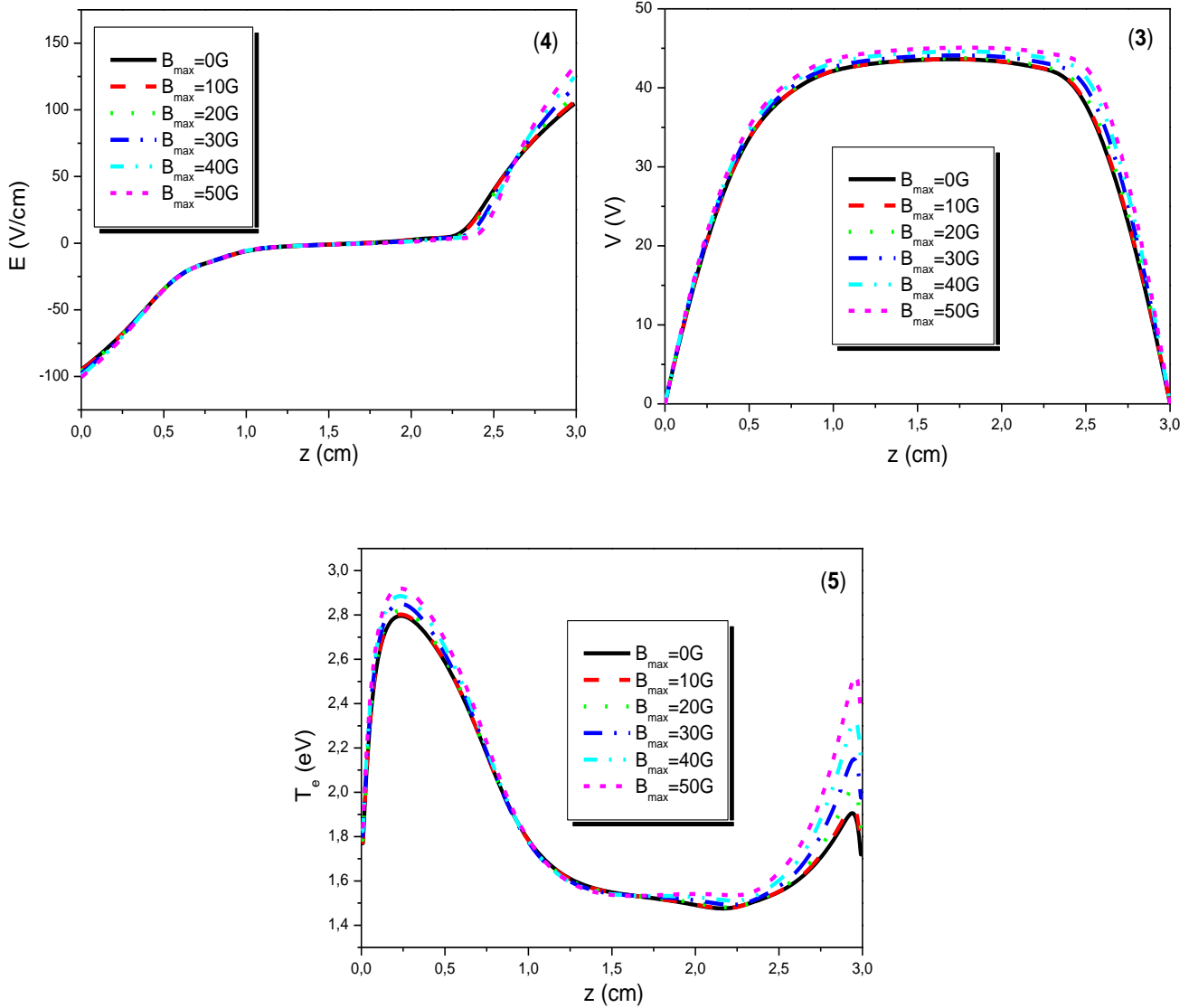
إن الحقل الكهربائي ما هو إلا تدرج للكمون الكهربائي. الشكل (IV-5) يوضح منحني الحقل الكهربائي لمختلف الأطوار الزمنية حيث نلاحظ أن قيمة الحقل الكهربائي معدومة في وسط البلازما للحيادية الكهربائية التي تمتاز بها هذه المنطقة، فيما يأخذ قيمة معتبرة داخل أعمدة اللبوسين بسبب الحركة الإهتزازية للإلكترونات.

إن منحني درجة الحرارة الإلكترونية الموضح في الشكل (IV-6) يبين أنه في اللحظة $\omega t=0$ تزداد درجة الحرارة داخل الغمد المهبطي؛ هذه الزيادة ترجع إلى التدرج الكبير للكمون الكهربائي من جهة ومن جهة أخرى في هذه المنطقة يكون التأين في ذروته. حيث تكون الإلكترونات نشطة وتأخذ طاقتها القيمة $4,12\text{eV}$ عند المهبط. أما عند الغمد المصعدي يوجد إنخفاض في درجة الحرارة الإلكترونية والسبب يعود إلى أن الطاقة الحركية للإلكترونات صغيرة ولأن هذه الأخيرة تتحرك في الإتجاه العكسي للحقل الكهربائي. تأخذ الطاقة القيمة حوالي $2,25\text{eV}$ عند المصعد. أما عند اللحظة $\omega t=\pi$ ، بالقرب من المهبط درجة الحرارة الإلكترونية تأخذ القيمة $2,21\text{eV}$. فيما تأخذ القيمة $3,05\text{eV}$ بالقرب من المصعد. السبب يعود إلى وجود الحقل المغناطيسي أين تكون طاقة الإلكترون أكبر بالقرب من اللبوسين.

2.IV. تأثير شدة الحقل المغناطيسي:

نثبت قيمة كل من فرق الجهد المطبق على المهبط $V_{RF}=-100\text{ V}$ والضغط $P=100\text{mTorr}$ وعند اللحظة الزمنية $\omega t=\pi/2$ نغير شدة الحقل المغناطيسي ما بين 0G و 50G ؛ وفقاً لهذه العوامل تكون المنحنيات على النحو التالي:



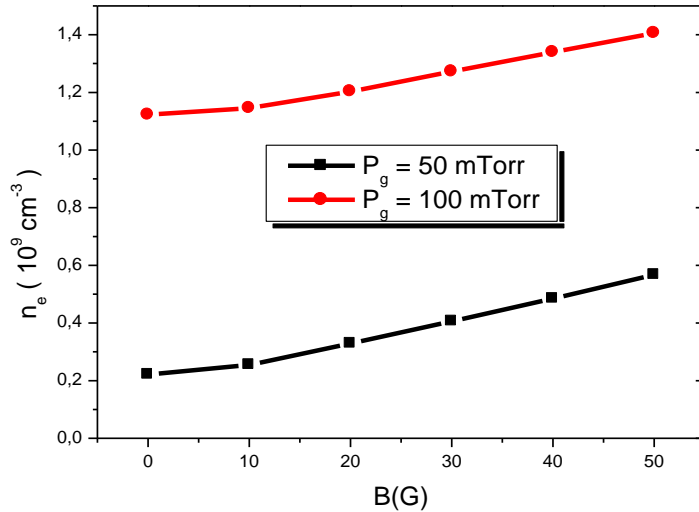


الشكل (7-IV): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (z) من أجل قيماً للحقل المغناطيسي (1) الكثافة الإلكترونية، (2) الكثافة الأيونية، (3) الكمون الكهربائي، (4) الحقل الكهربائي، (5) درجة الحرارة الإلكترونية.

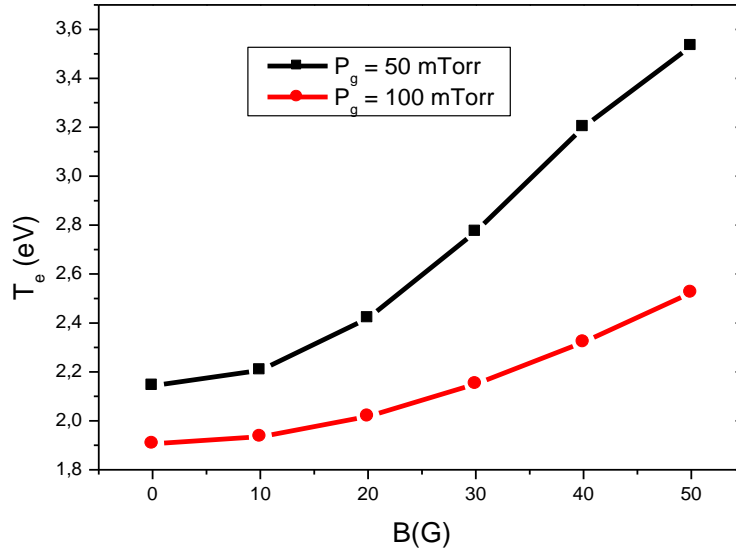
الشكل (7-IV) يوضح التوزيع الموضعي للخصائص الكهربائية للبلازما لقيم مختلفة لشدة الحقل المغناطيسي. المنحنيان (1.7) و (2.7) يمثلان على التوالي الكثافة الإلكترونية والأيونية، المنحني (3.7) يمثل الكمون الكهربائي، المنحني (4.7) يمثل الحقل الكهربائي و المنحني (5.7) درجة الحرارة الإلكترونية.

أظهرت النتائج أن الخصائص الكهربائية للبلازما تزداد عموماً عندما تزداد شدة الحقل المغناطيسي، يمكن تفسير زيادة كثافة الجسيمات المشحونة بأنه يكون مسار الإلكترونات مساراً حلزونياً. مما يؤدي إلى زيادة عدد الإصطدامات وإطالة زمن حياة الإلكترونات داخل مفاعل البلازما [7]، و كنتيجة لذلك تزداد كل من الكثافة الأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية وبالتالي مردود الرش.

الشكل (8-IV) والشكل (9-IV) يمثلان على التوالي منحنى تغير القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية والقيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة شدة الحقل المغناطيسي لضغط 50mTorr و 100mTorr، حيث نلاحظ أنه كلما زادت شدة الحقل المغناطيسي إزدادت كل من الكثافة ودرجة الحرارة الإلكترونية بشكل غير خطي [60،7]، فعند القيمة 50G للحقل المغناطيسي الكثافة الإلكترونية تتضاعف تقريباً ثلاثة مرات عند ضغط 50mTorr فيما تزداد بنسبة 25% عند الضغط 100mTorr، بينما درجة الحرارة الإلكترونية تزداد عند القيمة 50G للحقل المغناطيسي بنسبة 65% عند ضغط 50 mTorr وبنسبة 32% عند الضغط 100 mTorr.



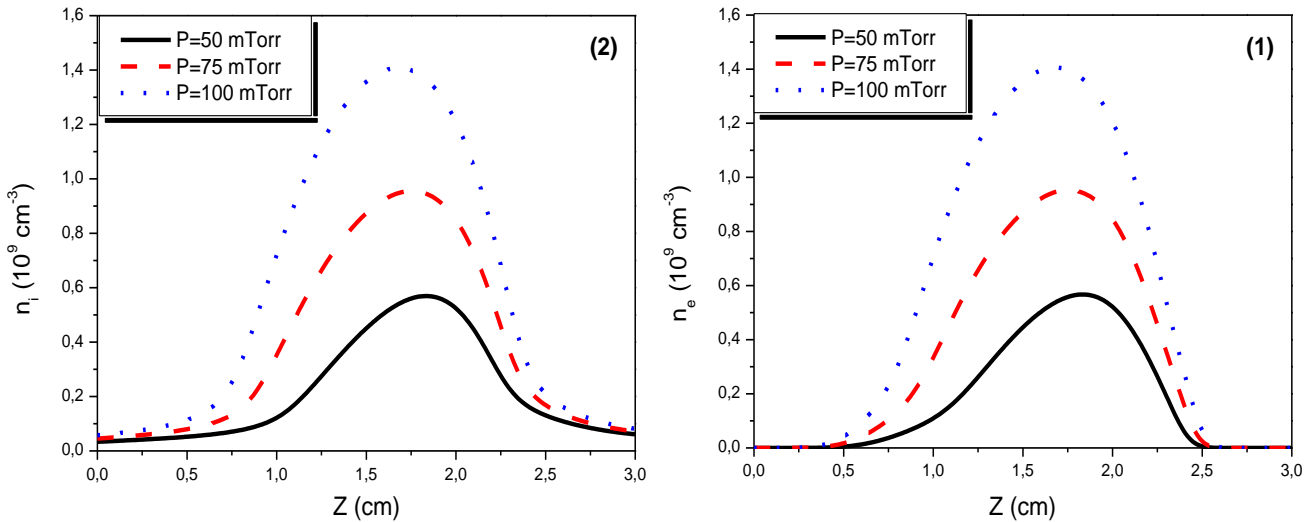
الشكل (8-IV): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة شدة الحقل المغناطيسي لضغط 50 mTorr و 100 mTorr.

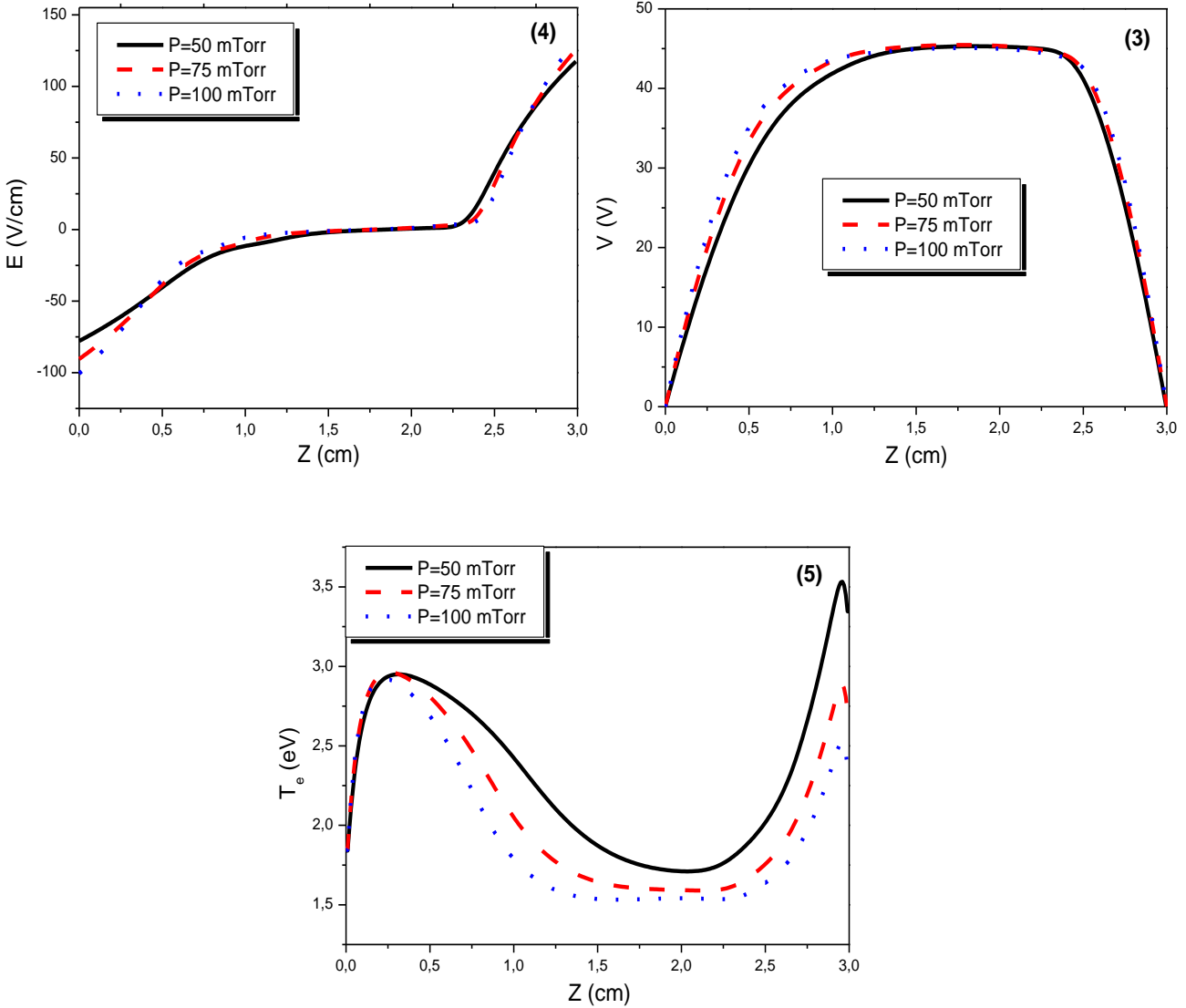


الشكل (9-IV): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة شدة الحقل المغناطيسي لضغط 50 mTorr و 100 mTorr.

3.IV. تأثير ضغط غرفة التفريغ:

نثبت قيمة كل من فرق الجهد المطبق على المهبط $V_{RF} = -100$ V وشدة الحقل المغناطيسي 50G وعند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi/2$ نغير قيمة الضغط 75mTorr، 50mTorr و 100mTorr، وفقاً لهذه العوامل تكون المنحنيات على النحو التالي:





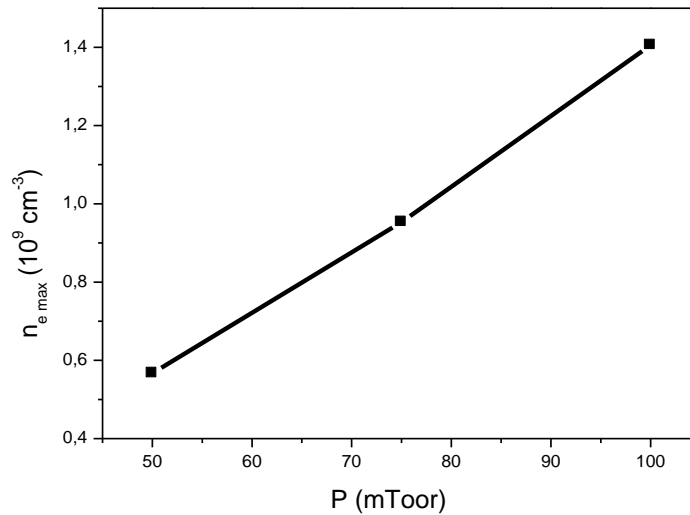
الشكل (10-IV): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (Z) من أجل قيماً للضغط غرفة التفريغ. ((1) الكثافة الإلكترونية، (2) الكثافة الأيونية، (3) الكمون الكهربائي، (4) الحقل الكهربائي، (5) درجة الحرارة الإلكترونية).

بينت الأشكال من (1.10-IV) إلى (5.10-IV) التي توضح التغير الموضعي لكل من الكثافة الإلكترونية والأيونية، الكمون والحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية على التوالي لقيم مختلفة لضغط غرفة التفريغ؛ أن هناك تناسب طردي بين هاته الخصائص الكهربائية للبلازما وضغط غرفة التفريغ باستثناء درجة الحرارة الإلكترونية حيث يكون

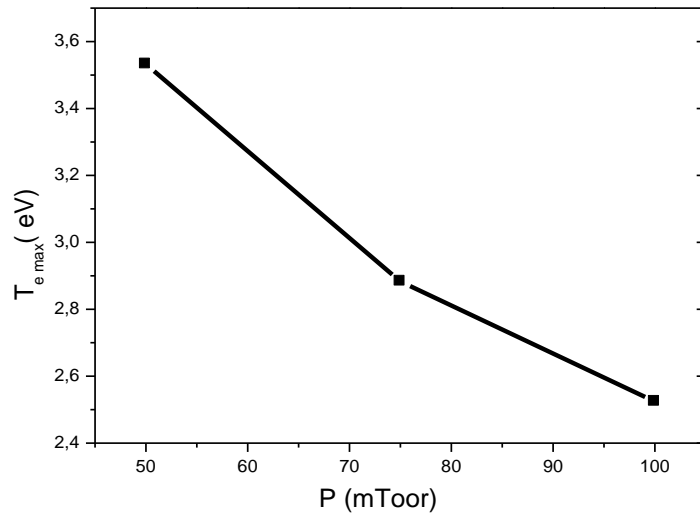
التناسب عكسي. حيث تفسر الزيادة بأنه كلما زاد الضغط يزداد تردد التصادم مما يؤدي إلى زيادة كثافة بلازما في حين يقل عرض الأعمدة لإنخفاض حركية وطاقة الأيونات الموجبة بسبب صغر مسارها الحر وكثرة التصادمات داخل هذه المنطقة، وكنتيجة حتمية لذلك يزداد الحقل الكهربائي عند الغمد المهبطي إذ يأخذ القيم التالية: 117.82V/cm ، 125.46V/cm و 132.50V/cm لضغط 50mTorr ، 75mTorr و 100mTorr على التوالي.

أما درجة الحرارة الإلكترونية فتتناسب عكسياً مع الضغط بسبب كثرة التصادمات التي تتعرض لها الإلكترونات ولصغر مسارها الحر أيضاً، مما يجعلها تفقد طاقتها خلال تصادمين متتاليين تحت تأثير الحقل الكهربائي.

يمكن أن نلخص هذا التأثير من خلال الشكل (11-IV) والشكل (12-IV) اللذان يمثلان على التوالي منحنى تغير القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية و القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة ضغط غرفة التفريغ، حيث نلاحظ أنه كلما زادت قيمة ضغط الغرفة إزدادت الكثافة الإلكترونية، فعند ضغط 100mTorr تتضاعف تقريبا بثلاثة مرات، بينما درجة الحرارة الإلكترونية تتناسب عكسياً فعند ضغط 100mTorr تنخفض بنسبة 29% .



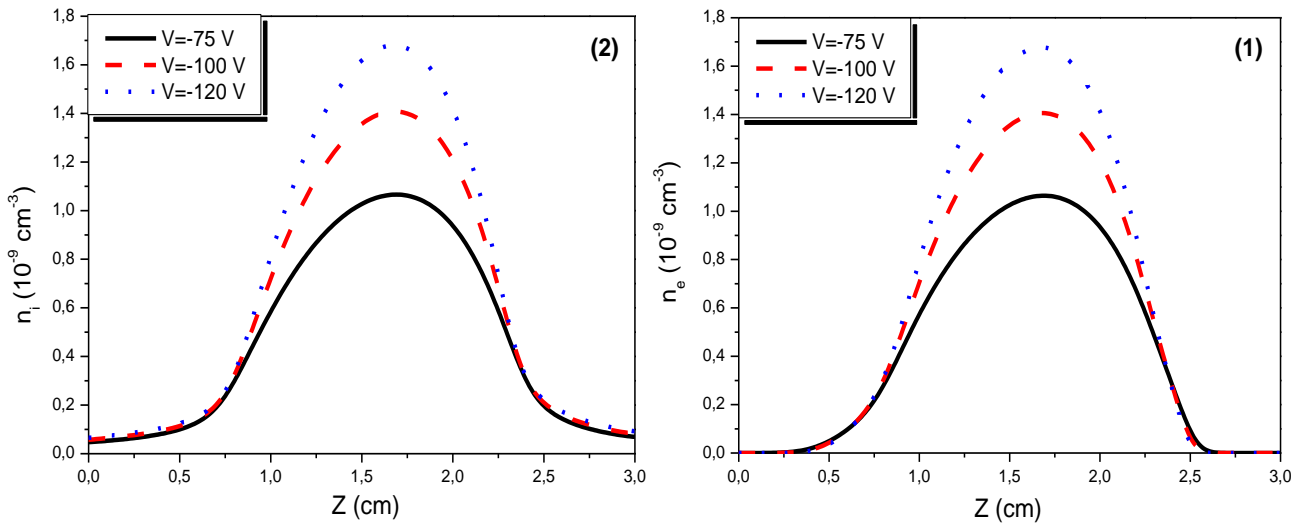
الشكل (11-IV): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة ضغط غرفة التفريغ.

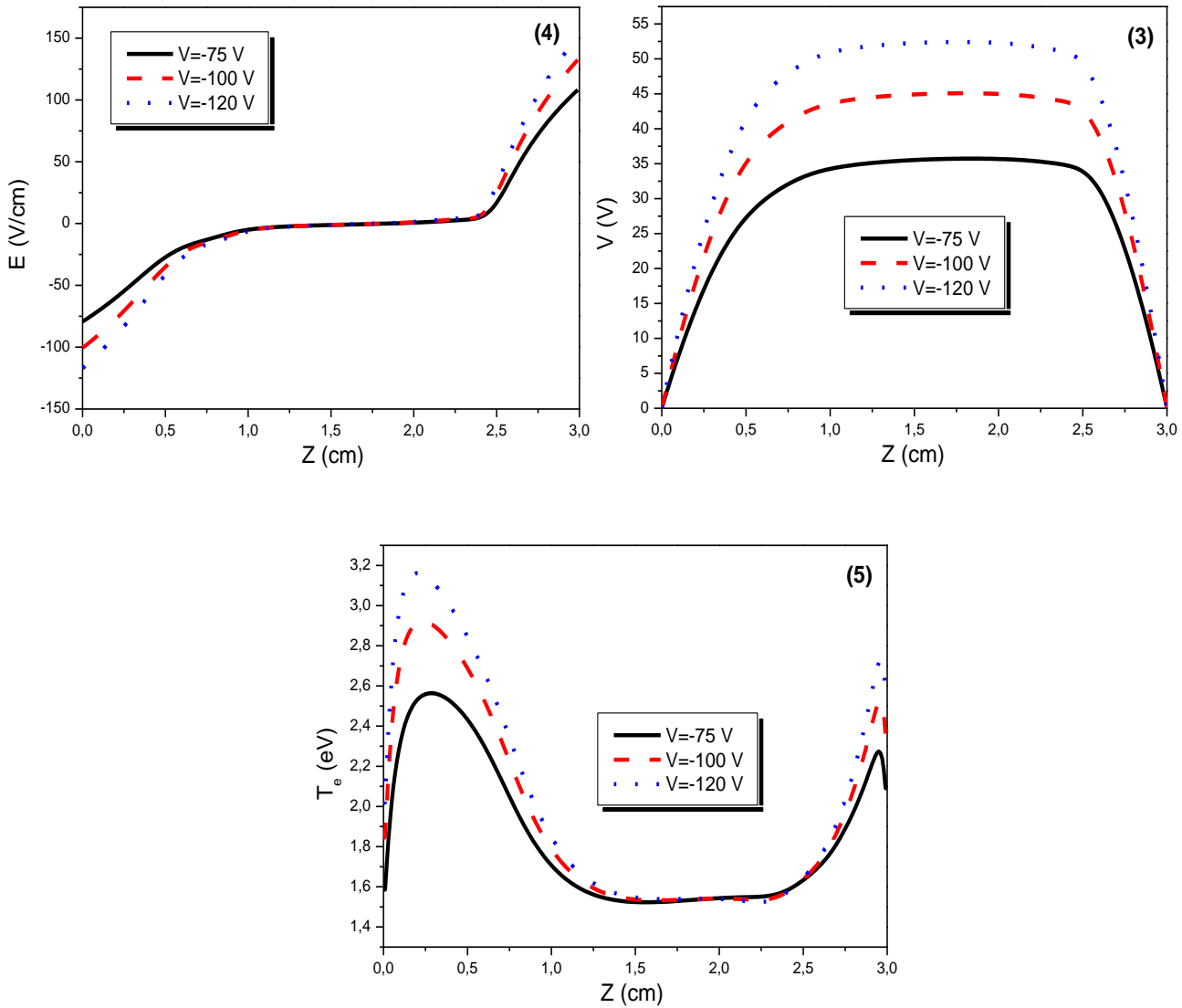


الشكل (12-IV): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة ضغط غرفة التفريغ.

4.IV. تأثير فرق الجهد المطبق:

في هذه الفقرة سنقوم بتغيير فرق الجهد المطبق على المهبط $-75V$ ، $-100V$ و $-120V$ ونثبت كل من الحقل المغناطيسي عند $50G$ وضغط غرفة التفريغ عند $100mTorr$ وعند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi/2$ نتحصل على النتائج التالية:

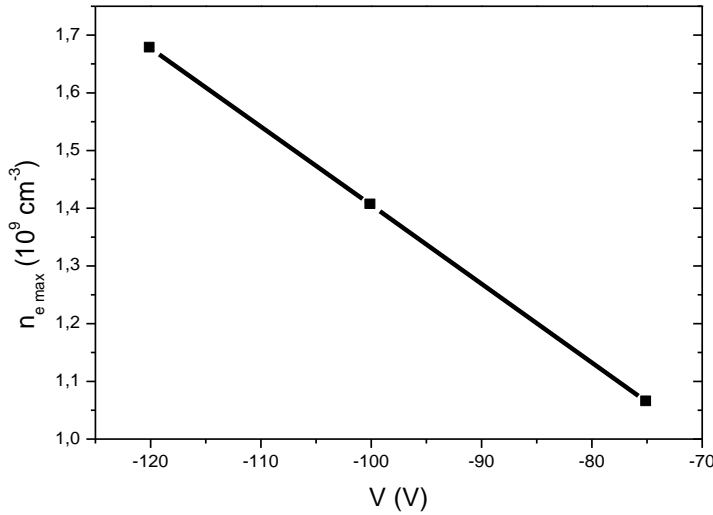




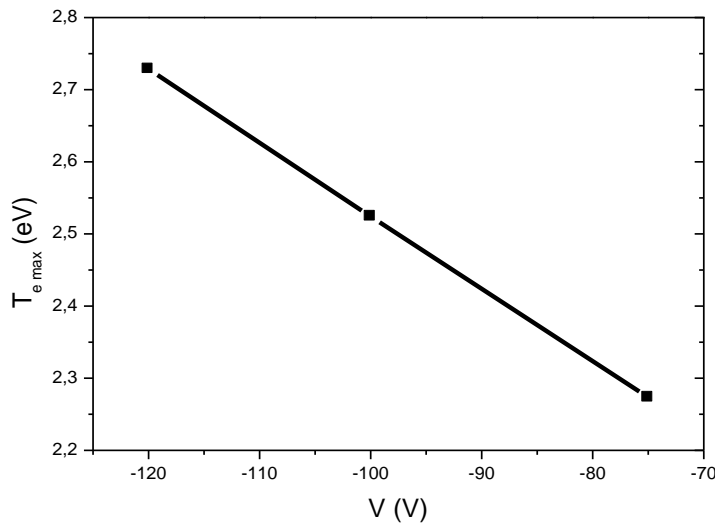
الشكل (13-IV): تغير الخصائص الكهربائية لبلازما وفق البعد (z) من أجل قيماً لفرق الجهد المطبق. ((1) الكثافة الإلكترونية، (2) الكثافة الأيونية، (3) الكمون الكهربائي، (4) الحقل الكهربائي، (5) درجة الحرارة الإلكترونية).

نلاحظ من خلال الأشكال (1.13-IV) إلى (5.13-IV) التي تمثل التوزيع الموضعي لكل من الكثافة الإلكترونية والأيونية، الكمون والحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية على التوالي لقيم مختلفة لفرق الجهد المطبق أنه كلما زادت قيم هذا الأخير إزدادت قيم الخصائص الكهربائية للبلازما أي أن التناسب طردي بينهما. حيث يمكن أن نلخص هذه الزيادة في منحنى تغير القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية (الشكل (14-IV)) والقيمة

القصى لدرجة الحرارة الإلكترونية (الشكل (IV-15)) عند الغمد المهبطي بدلالة فرق الجهد المطبق، حيث نلاحظ كلما زاد فرق الجهد ازدادت كل من الكثافة ودرجة حرارة الإلكترونات، فعند القيمة (-120V) للفرق الجهد تزداد الكثافة الإلكترونية بنسبة 58%، بينما درجة الحرارة الإلكترونية تزداد بنسبة 20% .



الشكل (IV-14): القيمة القصوى للكثافة الإلكترونية بدلالة فرق الجهد المطبق.



الشكل (IV-15): القيمة القصوى لدرجة الحرارة الإلكترونية عند الغمد المهبطي بدلالة فرق الجهد المطبق.

5.IV. حساب المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير:

بعد التطرق في الفصل السابق إلى كيفية حساب المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير، نستطيع الآن رسم مناطقه الثلاث بكل بساطة، مع إعتبار الأشكال الهندسية الثالثة لمسبار: مسطح، إسطواني وكروي ذات الأبعاد التالية [39،59]:

كروي	إسطواني	مسطح	المسبار الأبعاد
$0.5024 \cdot 10^{-2}$	$1.0048 \cdot 10^{-2}$	$0.2512 \cdot 10^{-2}$	$A_s(m^2)$ $r_s = 0.02mm$ $L = 0.08 mm$

نلخص في الجدول (1-IV) القيم المتوسطة خلال أزمنة الدور لأهم المقادير الماكروسكوبية لبلازما الأرجون المستعملة في عملنا هذا لمناطق مختلفة بين اللبوسين وبإعتبار الشروط التجريبية التالية: شدة الحقل المغناطيسي $B=50G$ ، فرق الجهد المطبق على اللبوس المهبطي $V_{RF}=-100V$ ، ضغط غرفة التفريغ $P=100mTorr$ ، والبعد بين اللبوسين $d=3cm$.

يتم حساب القيم المتوسطة خلال أزمنة الدور RF لكل من: الكثافة الإلكترونية والإيونية والكمون الكهربائي وفق المعادلة التالية:

$$X_{moy} = \frac{\sum_{k=1}^{kmax-1} X_k}{(kmax - 1)}$$

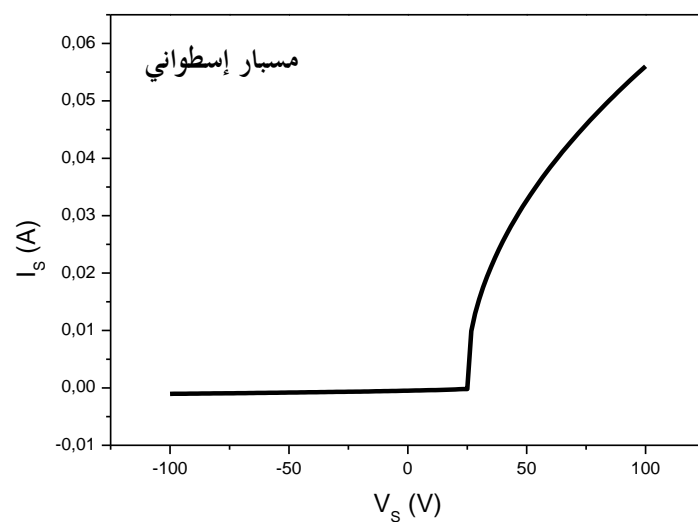
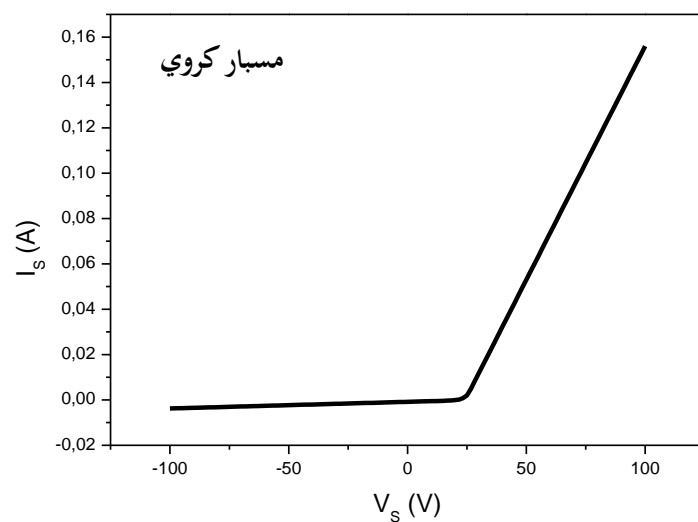
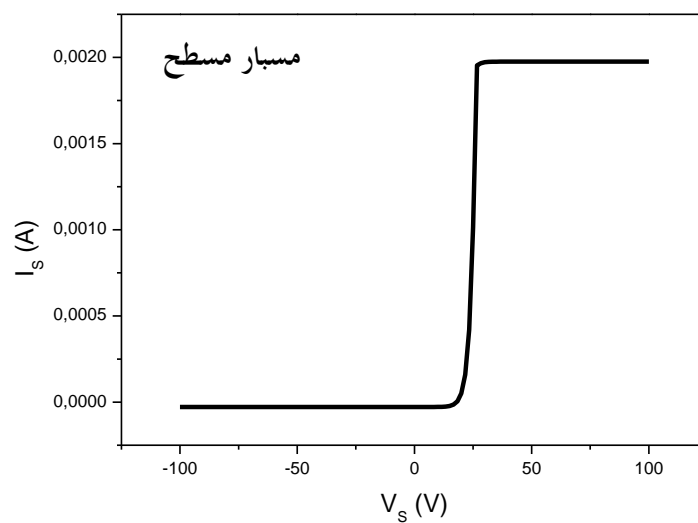
فيما القيمة المتوسطة خلال أزمنة الدور RF لدرجة الحرارة الإلكترونية تحسب بالعلاقة التالية:

$$T_{e moy} = \frac{\sum_{k=1}^{kmax-1} N_{ek} T_{ek}}{(kmax - 1)N_{e moy}}$$

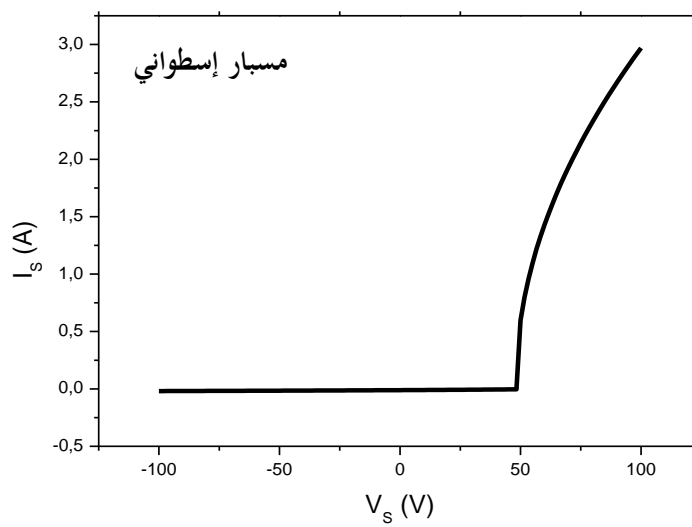
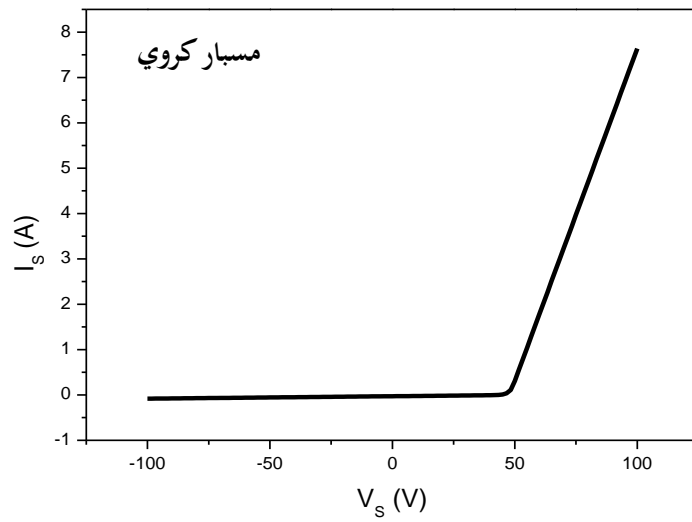
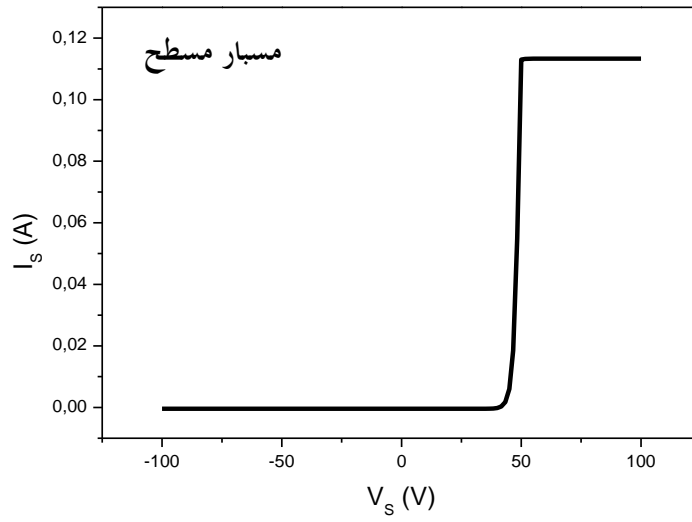
الجدول (1-IV): القيم المتوسطة للمقادير الماكروسكوبية لبلازما الأروغون عند مناطق مختلفة بين اللبوسين.

		$n_e (10^9 \text{ cm}^{-3})$	$n_i (10^9 \text{ cm}^{-3})$	$V_p (V)$	$T_e (eV)$
بالقرب من المصعد	$Z_1 = 0.3 \text{ cm}$	$2.21 \cdot 10^{-2}$	$9.07 \cdot 10^{-2}$	30.69	1.93
وسط البلازما	$Z_2 = 1.5 \text{ cm}$	1.58	1.58	59.10	1.56
بالقرب من المهبط	$Z_3 = 2.7 \text{ cm}$	$2.61 \cdot 10^{-2}$	0.11	32.95	1.93

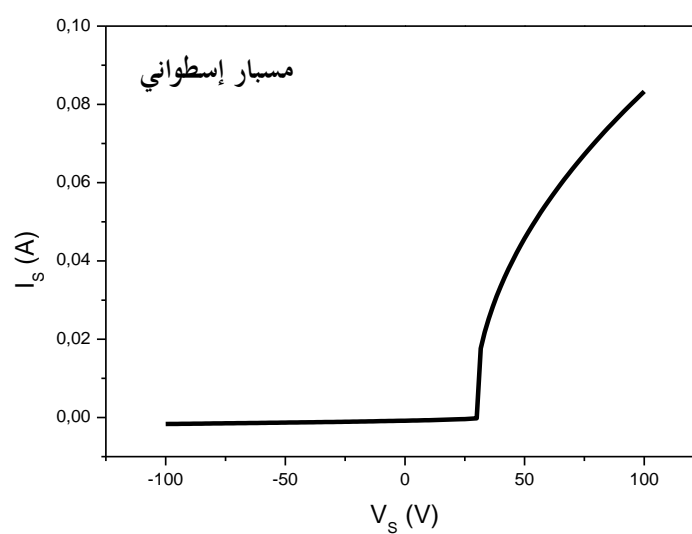
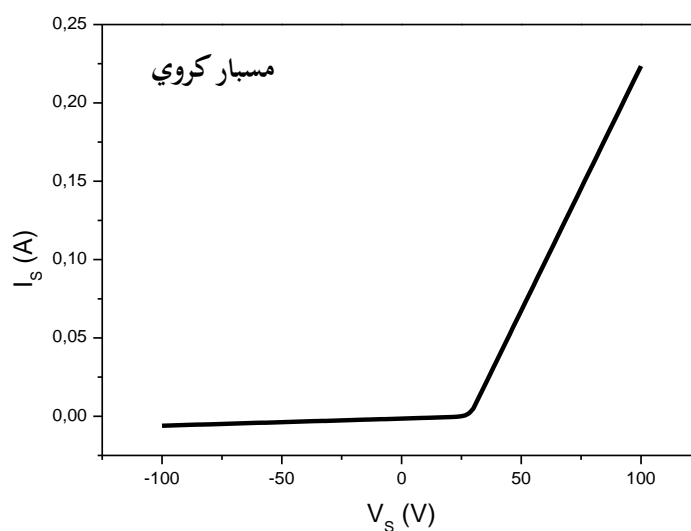
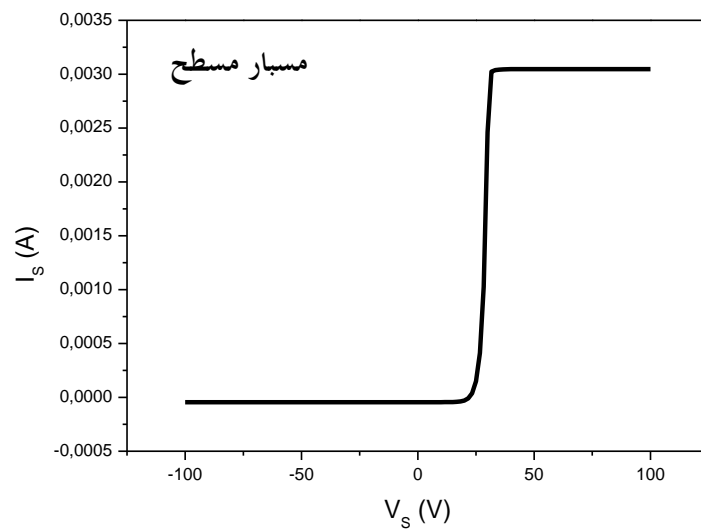
توضح الأشكال من (16-IV) إلى (18-IV) المنحى المميز تيار- جهد لمسبار لانجمير عند المناطق السالفة الذكر.



الشكل (16-IV): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_1 = 0.3$ cm



الشكل (17-IV): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_2 = 1.5$ cm.



الشكل (18-IV): المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير عند الموضع $Z_3 = 2.7$ cm.

6.IV. حساب معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي:

من ضمن المقادير التي يمكننا إستنتاجها من خلال نتائجنا معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي والمعرف عند المهبط بالعلاقة التالية:

$$J_e = -\gamma J_i$$

ف عند الشروط التجريبية التالية: فرق الجهد المطبق على اللبوس المهبطي $V_{RF} = -100V$ ، ضغط غرفة التفريغ $P = 100mTorr$ ، شدة الحقل المغناطيسي $B = 50G$ والبعد بين اللبوسين $d = 3cm$ تكون القيمة العددية لمعامل الإصدار الإلكتروني الثانوي هي: $\gamma = 0,35$.

الخلاصة العامة

والآفاق

الخلاصة العامة والآفاق

تعد طريقة توضع الطبقات الرقيقة بجهاز الرش المهبطي المغنطروني من أهم طرق التفرغ المتوهج، إذ تمتاز هذه الأخيرة بإمكانية توضع عوازل وناقل وأنصاف ناقل للطبقات الرقيقة بنوعية جيدة وعند درجات حرارة منخفضة. نظرا لوجود الحقل المغناطيسي إستقردت طريقة الرش المهبطي المغنطروني بسرعة توضع ومردود رش كبيرين مع إمكانية إنتاج شرائح رقيقة عالية الجودة ذات خواص ميكانيكية جيدة لأجل هذا عرفت هذه الطريقة صناعيا صدى واسع وانتشار كبير [1].

قمنا في هذا العمل أولا بدراسة نموذجية للخصائص الكهربائية لبلازما الأروغون المستعملة لتوضع الطبقات الرقيقة بطريقة الرش المهبطي المغنطروني المغذى بمصدر جهد متناوب ذو تردد مذياعي وهذا بتطبيق نموذج المواع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد، حيث إعتبرنا الحركية الإلكترونية مرتبطة بالحقل المغناطيسي ومعامل الإنتشار الإلكتروني مرتبط بدرجة الحرارة الإلكترونية المتغيرة وفق علاقة أنشتاين، فيما إستخدامنا الصيغة الأسية لعبارة التدفق [55]. ثانيا قمنا بدراسة تشخيصية لهذه الخصائص الكهربائية بتطبيق النتائج المتحصل عليها من الدراسة الأولى على المشخص الآلي مسبار لانجمير لإيجاد مميزه تيار-جهد حسب شكل المسبار ومكان توضع ثم إستنتجنا معامل الإصدار الإلكتروني الثانوي .

لأجل هذا قدمنا رسالتنا في أربعة فصول على النحو التالي:

الفصل الأول تناولنا فيه بإيجاز عموميات عن البلازما ثم تطرقنا بعناية لطريقة الرش المهبطي، مركزين في ذلك على الرش المهبطي المغنطروني المستخدم في عملنا هذا.

الفصل الثاني تضمن أهم الطرق التشخيصية والنمذجية المستعملة لدراسة البلازما وتحديد خصائصها الكهربائية : تطرقنا أولا إلى طرق تشخيص البلازما: تقنية التشخيص الضوئي، مطياف الكتلة و مسبار لانجمير. كانت الدراسة تفصيلية لمسبار لانجمير. ثانيا إلى

نمذجة البلازما؛ كانت دراستنا لنموذج المواع أكثر تفصيلا من خلال المعادلات الثلاثة الأ وهي معادلة الإستمرارية ومعادلة الطاقة مكملة بمعادلة بواسون.

الفصل الثالث تطرقنا فيه إلى النموذج الرياضي المستعمل وكيفية تطبيق معادلات نموذج المواع على بلازما الأرغون حيث قمنا بتحديد أهم المقادير الفيزيائية المرتبطة بنوعية الغاز، تم أختارنا طريقة الحجم المنتهية للحل العددي معتبرين في ذلك الصيغة الأسية لعبارة التدفق. قمنا بتحديد أيضا الشروط الإبتدائية والحدية على مستوى اللبوسين، وبعدها تبينا لنا مصفوفية المعادلات أختارنا طريقة توماس للحل البرمجي. تناولنا بإسهاب كيفية إيجاد المميز تيار- جهد لمسبار لانجمير من خلال النتائج المتحصل عليها من نموذج المواع حسب شكل المسبار. في الأخير وضحنا خريطة سير الحساب العددي لبرنامجنا.

في الفصل الرابع تمت مقارنة منحنى الكثافات لنتائجنا بمنحنى الكثافات في المرجع [14]، حيث أبدت إتفاقا كبير، سواء من ناحية السلوك أو القيم العددية إذ لاحظنا ذلك في المنحنى وسط بلازما ومنحنى غمد البلازما. تمت دراسة ومناقشة تأثير الوسائط الماكروسكوبية كقيمة الحقل المغناطيسي، ضغط غرفة التفريغ وفرق الجهد المطبق على المهبط على كل من: الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي و درجة الحرارة الإلكترونية ، وقد تبين لنا التناسب الطردي بين أغلبية هذه الوسائط والخصائص الكهربائية للبلازما، حيث نذكر على سبيل المثال فعند القيمة 50G للحقل المغناطيسي تتضاعف الكثافة الإلكترونية والأيونية بثلاثة مرات تقريبا عند ضغط 50mTorr مما يترتب زيادة نسبة التأين بالتالي زيادة مردود الرش وهذا ما يسعى إليه الباحثون. وإختتامًا للفصل طبقنا النتائج المتحصل عليها سابقا لإيجاد المميز تيار- جهد لمسبار لانجمير من ناحية الشكل ومكان توضع في الجهاز وإستنتجنا معامل الإصدار الإلكتروني حيث أخذ القيمة $\gamma = 0.37$ عند الشروط التجريبية الأتية: فرق الجهد المطبق على اللبوس المهبطي $V_{RF} = -125$ ، ضغط غرفة التفريغ $P = 100mTorr$ ، شدة الحقل المغناطيسي $B = 30G$ والبعد بين اللبوسين $d = 3cm$.

إن ما أنجزناه في هذه الرسالة دفعنا إلى طرح اقتراحات وأفكار أخرى لتطبيق نموذج المواع على بلازما مغنطرونية، قد تكون منطلقات لأعمال أخرى. من هذه الأفكار نذكر:

1. دراسة نموذج المواع لبعدين أو ثلاثة مع أخذ بعين الإعتبار شكل (أبعاد) اللبوسين.
2. دراسة نموذج المواع لمزيج غازي مع تحديد نسبة كل غاز.

3. تغيير نظام تغذية الرش وإعتبار التغذية تتم بتيار مسمر DC. مما يؤدي إلى إعتبار شروط حدية أخرى.
4. و من ضمن الإقتراحات أيضا معالجة الإلكترونات السريعة المتواجدة على مستوى غمد اللبوسين بطريقة أكثر دقة ألا وهي المحاكاة العددية مونتني كارلو مما يدفعنا إلى تغيير نموذج الدراسة إلى النموذج الهجين.

المراجع

المراجع

- [1] I. Kolev, A. Bogaerts; Numerical models of the planar magnetron glow discharges; *Contrib. Plasma Phys.* **44**, 582-588 (2004).
- [2] B.-W. Koo, N. Hershkowitz and M. Sarfaty; Langmuir probe in low temperature, magnetized plasmas: Theory and experimental verification; *J. Appl. Phys.*, 86(3), 1213 (1999).
- [3] N. Attaf; Etude énergétique d'une décharge luminescente utilisée dans le dépôt de couches minces de a-Si:H; Thèse de doctorat, Université de Constantine (2003).
- [4] C. Costina, G. Popaa, G. Gousset; On the secondary electron emission in dc magnetron discharge; *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **7**, 2465-2469 (2005).
- [5] N. F. Cramer; Analysis of a one-dimensional steady-state magnetron discharge; *J. Phys.*, *D. Appl. Phys.* **30**, 2573-2584 (1997).
- [6] H. Kumar and S. Roy; Multidimensional hydrodynamic plasma-wall model for collisional plasma discharges with and without magnetic-field effects; *Physics Of Plasmas*, **12**, 0935081-09350810 (2005).
- [7] D. Benyoucef; Modélisation particulière et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétiques; [Ph.D], Université de Toulouse III – Paul Sabatier (2011).
- [8] A. Palmero, E. D. van Hattum, W.M. Arnoldbik and F.H.P.M. Habraken; Argon plasma modeling in a RF magnetron sputtering system; *Surface & Coatings Technology*, 392-398 (2004).
- [9] Y. Lin, R. A. Adomaitis; A global basis function approach DC glow discharge simulation; *Phys. Lett A*, **243**, 142-150(1998).
- [10] A. Bouchikhi ; Two-dimensional numerical simulation of the dc glow discharge in the normal mode and with einstein's relation of electron diffusivity; *Plasma Sci. Technol.*, **14**, 965-973 (2012).
- [11] A. Bouchikhi, A. Hamid; 2D DC Subnormal glow discharge in argon; *plasma sci. technol.* **12**, 59-66 (2010).
- [12] H. Tebani, A. Hennad; Three-dimensional modelling of the DC glow discharge using the second order fluid model; *Przegląd elektrotechniczny*, 166-171 (2013).
- [13] M. Dalvie, M. Surendra and G.S. Selwyn; Self-consistent fluid modeling of radio frequency discharges in two dimensions; *Appl. Phys. Lett.* **62**, 3207-3209 (1993).

- [14] Y. Lin and R. A. Adomaitis; Simulation and model reduction methods for an RF plasma glow discharge; Journal of Computational Physics, **171**, 731-752 (2001).
- [15] J. L. Delcroix et A. Bers; Physique des plasmas; Ed. CNRS, Paris (1994).
- [16] P. Fauchais; Gaz ionisé et plasma; Technique de l'ingénieur, AF35.60
- [17] O. Meglali; Caractérisation d'une décharge luminescent radio-fréquence par sonde électrostatique; Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2002).
- [18] D. Clarisse; Etude de plasmas generes par laser, soumis a des champs magnetique et électrique.utilisation possible en techniques de depots; Thèse de docteur, Université Joseph Fourier - Grenoble 1 (2003).
- [19] M. A. Lieberman, and A. J. Lichtenberg; Principles of Plasma Discharges and Materials Processing; Ed. John Wiley & Sons (1994).
- [20] ب. يافورسكي، أ. ديتلاف، ترجمة الدكتور فريد يوسف متى؛ المرجع في الفيزياء- الجزء الأول؛ دار مير- موسكو، بيروت (1992).
- [21] A. Bouraiou; Etude et modélisation d'une décharge luminescent; Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2003).
- [22] Y.mei Jiang; Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur; Doctorat en Science, Université de Paris Xi d'Orsay (1992).
- [23] 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).
- [24] C. Pedoussat; Modélisation auto-cohérente de la pulvérisation cathodique dans les décharges luminescentes basse pression; Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse (1999).
- [25] ز. بلة؛ الدراسة التشخيصية بالمحاكاة العددية لمسبار كهربائي ساكن في رش مهبطي؛ مذكرة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007).
- [26] J. J. Bessot; Dépôt par pulvérisation cathodique; Technique de l'ingénieur, M 1657.
- [27] ع. عطاق؛ ترسب و تشخص شرائح نيتريد السيليسيوم اللامتبلور المحضر بطريقة الرش المهبطي؛ دكتوراه دولة، جامعة محمد خضير بسكرة (2005).
- [28] A. M. Pointu; Décharge électrique; Technique de l'ingénieur, D 322.
- [29] D. Poirier; Validation de la vitesse de l'écoulement d'un plasma à l'aide de sonde électrostatique par la fluorescence induite par laser; Thèse de Philosophie Doctor, Université de Québec (1998).
- [30] R. H. Hundulstan, S. L. Leonanl; Plasma Diagnostic Technique; (1965).
- [31] A. Zaatri; Contribution à l'utilisation des sondes électrostatiques pour l'analyse in –situ des filme minces de polysilixane déposés par plasma BF; Thèse de Magister, Université de Constantine (1994).
- [32] J. D. Swift, M.J.R.Schwar, London books.Ltd (1970).

- [33] R. L. Merlino; Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics; University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242; Am. J. Phys., Vol. 75, No. 12, (2007).
- [34] L. Conde; An introduction to Langmuir probe diagnostics of plasmas; Departamento de Física Aplicada E.T.S. Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid 28040, Madrid, Spain, (2011).
- [35] F. Delmote; Dépôts de films minces SiN_x assistés par plasma de haute densité. Etudes corrélées de la phase gazeuse, de l'interface SiN_x/InP et de la passivation du transistor bipolaire à hétérojonction InP; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud (1998).
- [36] S. Wintzta, B. Wnuk, H. Majewski-Minor, T. Niemyski, Thin Solid Films, 32, 251, (1972).
- [37] A. Hallil; Synthèse par décharge luminescente RF et Caractérisation de couches minces de carbone amorphe hydrogène, diagnostic de la décharge par sonde de Langmuir; Thèse de doctorat, Paul Sabatier, Toulouse (1995).
- [38] J. L. Wilson, J. B. U. Caughman, D. N. Ruzic, J. Vac. Sci. Technol. A7 (3). (1989).
- [39] A. Bousbia Brahim; Diagnostic des plasmas par la sonde électrostatique de Langmuir; Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla (2013).
- [40] J. C. Loretz; Elaboration par décharge luminescente radiofréquence de couches minces de Nitrure d'Aluminium Hydrogène. Etude des propriétés électrique des films; Thèse de doctorat, Paul Sabatier, Toulouse (1994).
- [41] E. Gogolides et E.-H. Sawin; Continuum modeling of radiofrequency glow discharges, I. Theory and results for electropositive and electronegative gases; J. Appl. Phys. 72(9), 3971-3987 (1992).
- [42] C. Taieg; Etude d'un plasma froid utilisé lors de dépôt de couches minces; Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (1999).
- [43] M. Dalvie, S. Hamagushi, and R. T. Farouki; Self-consistent model of a direct-current glow discharge: treatment of fast electrons; Phys. Rev. A41, 1112 (1990).
- [44] A. Bogaerts and R. Gijbels; Hybrid Monte Carlo-fluid model for a microsecond pulsed glow Discharge; J. Anal. At. Spectrom. 15, 895 (2000).
- [45] J. L. Delcroix; Physique des gaz et des plasma; Encyclopedia Universalis (1997).
- [46] M. Moisan, J. Pelletier; Physique des plasmas collisionnels application aux décharges haute fréquence; France (2006).
- [47] م. فاروق أحمد و أ. محمد السريع؛ أسس الفيزياء الإشعاعية؛ جامعة الملك سعود (1992).
- [48] T. Callegari; Modélisation et diagnostics de décharges à barrières diélectrique pour écran à plasma; Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse (2000).
- [49] C. Punset; Modélisation bidimensionnelle fluide d'un écran à plasma; Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse (1998).
- [50] 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, 24-31 (2009).

- [51] س. عبيد؛ دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في جهاز الرش المهبطي المغنطروني باستعمال طريقة الحجوم المنتهية؛ ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2012).
- [52] ز. قويدري، "مفعول درجة الحرارة الإلكترونية على الخصائص الكهربائية في بلازما التفريغ الكهربائي"، ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2015).
- [53] خ. بن واعر؛ الخصائص الكهربائية لبلازما متعدد المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF؛ مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2014).
- [54] S. Kobbi; Etude des mélanges gazeux pour le calcul des propriétés électriques de plasmas à plusieurs composantes ioniques dans un pulvérisateur cathodique en régime RF; Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla (2017).
- [55] Z. Ballah and F. Khelfaoui; Numerical modeling of the electrical properties plasma argon in a rf magnetron sputtering and with einstein's relation of electron diffusivity; Journal of King Saud University-Science (JKSUS). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.09.004> (2018).
- [56] D. L. Scharfetter and H. K. Gummel; Large-signal analysis of a silicon read diode oscillator; IEEE Trans. Electron Devices, **16**, 64 (1969).
- [57] S. V. Patankar; Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; McGraw-Hill, New York, 1980.
- [58] J. Hoffman; Numerical Methods for Engineers and Scientists; Marcel Dekker, New York, 2001.
- [59] Z. Ballah, S. Abid, A. Bousbia brahim et F. Khelfaoui; Modélisation numérique de la caractéristique courant-tension par la sonde de Langmuir dans un pulvérisateur cathodique magnétron; Séminaire International sur la Physique des Plasmas (SIPP'2015), Ouargla (Algérie).
- [60] K. G. Kostov and J. J. Barroso; Numerical simulation of magnetic-field enhanced plasma immersion ion implantation in cylindrical geometry; IEEE Trans. Plasma Sci, **34**, 1127 (2006).

النمذجة العددية لخصائص كهربائية، موضعية وزمنية، لبلازما الأرجون والحساب العددي لمسبار لانجمير في رش

مهبطي مغنطروني لنظام RF

ملخص: قمنا في هذا العمل بتطوير النمذجة العددية لرش المهبطي المغنطروني ذو تردد مذياعي RF13.56 MHz من أجل حساب الخصائص الكهربائية لبلازما الأرجون، باستخدام نموذج المواع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد. هذا النموذج يعتمد على معادلة الاستمرارية ومعادلة الطاقة الإلكترونية مرتبطة بمعادلة بواسون. حيث قمنا بإعتبار الحركة الإلكترونية مرتبطة بالحقل المغناطيسي ومعامل الانتشار الإلكتروني متعلق بدرجة الحرارة الإلكترونية وفق علاقة أنشتاين. وإستخدما الصيغة الأسية لعبارة التدفق. تم حل المعادلات عددياً بطريقة الحجوم المنتهية، و برمجياً بخوارزمية توماس. النتائج المتحصل عليها للخصائص الكهربائية لبلازما؛ الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية كانت على توافق مع نتائج باحثين آخرين. وكنتهيناً لعملنا قمنا بدراسة تأثير الحقل المغناطيسي، ضغط غاز و فرق الجهد المطبق على خصائص بلازما، وفي الأخير قمنا بحساب عددي للمميز تيار-جهد لمسبار لانجمير.

الكلمات المفتاحية: الرش المهبطي المغنطروني، بلازما الأرجون، الخصائص الكهربائية، نموذج المواع، الحركة الإلكترونية، معامل الانتشار الإلكتروني، علاقة أنشتاين، الصيغة الأسية، خوارزمية توماس، مسبار لانجمير.

Modélisation numérique des propriétés électriques, spatiales et temporelle, d'un gaz d'argon et le calcul numérique de la sonde de Langmuir dans un pulvérisateur cathodique magnétron en régime RF

Résumé: Dans ce travail, nous avons développé une modélisation numérique de pulvérisation cathodique magnétron alimentée par une source de tension radiofréquence RF13.56 MHz pour calculer les propriétés électriques d'un plasma d'argon, en utilisant le modèle fluide d'un système unidimensionnel dépendant du temps. Ce modèle est basé sur l'équation de continuité et l'équation de l'énergie électronique couplée avec l'équation de Poisson. Nous avons considéré la mobilité électronique dépendant du champ magnétique et le coefficient de diffusion électronique dépendant de la température électronique en fonction de la relation d'Einstein. Nous avons utilisé le schème exponentiel du terme de flux. Les équations ont été résolues numériquement par la méthode des volumes finis et la méthode itérative d'algorithme de Thomas. Les résultats obtenus pour les propriétés électriques du plasma (densité électronique, densité ionique, potentiel électrique, champ électrique et température électronique) étaient cohérents avec les résultats d'autres auteurs. Pour valoriser nos travaux nous avons étudié l'effet du champ magnétique, de la pression du gaz et de la tension appliquée sur les propriétés du plasma. Finalement, nous avons calculé la caractéristique courant-tension de la sonde de Langmuir.

Mots clefs: Pulvérisation cathodique magnétron, plasma d'argon, propriétés électriques, modèle fluide, mobilité électronique, coefficient de diffusion électronique, relation d'Einstein, schéma exponentiel, Algorithme de Thomas, sonde de Langmuir.

Numerical modeling of electrical properties, spatial and temporal of an argon gas and numerical calculation of the Langmuir probe in RF magnetron sputtering

Abstract: In this work, we have developed a numerical model of radio-frequency RF13.56 MHz magnetron sputtering to calculate electrical properties of argon plasma, using the fluid model of one-dimensional time-dependent system. This model is based on continuity equation and energy electron equation coupled with Poisson's equation. We have considered the electron mobility depends on magnetic field and the electron diffusivity is assumed to be dependent of electron temperature by Einstein's relation. The fluxes are discretized using the exponential scheme. We have resolved equations with numerical finite volume method and the Thomas algorithm iterative method. The obtained results for the electrical properties (electron and ion densities, electrical potential, electric field and electron temperature) are in good agreement with previous works. To valorize our work we studied the effect of the magnetic field, the gas pressure and the applied voltage on the properties of the plasma. Finally, we calculated the current-voltage characteristic Langmuir probe.

Keywords: Magnetron sputtering, Argon plasma, electrical properties, fluid model, electron mobility, electron diffusivity, Einstein's relation, exponential scheme, Thomas algorithm, Langmuir probe.