

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: فيزياء الإشعاعات

من إعداد الطالبة: رقايدة أوريدة

بعنوان:

دراسة الخصائص الكهربائية لبلازما غاز SF_6 في جهاز رش
مهبطي متناوب RF

نوقشت بتاريخ:

2020 / 10 / 01

أمام أعضاء لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	أ.د. باباحني أم الخير
ممتحنا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	د. لمقدم سومية
مشرفا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر (ب)	د. بله زكية
مساعد مشرف	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	أ.د. فتحي خلفاوي

الموسم الجامعي: 2019/ 2020

الإهداء

أهدي ثمرة جهدي هذا إلى أعز وأغلى إنسانة في حياتي **أمي الغالية**.
وإلى **روح أبي الطاهر رحمه الله**.
وإلى إخواني الأعمام محمد الشريف، علي، لخضر وأنيس، وأخواتي هاجر،
نبيلة، مباركة و إبنتها سمية... جميعهم حفظهم الله عز و جل وإلى ابن أختي
الكتكوت لقمان.
إلى كل العائلة الكريمة كبيرا وصغيرا، وإلى صديقاتي أسماء عبد النبي، شيما
بوشارب، سعيدة غريب، فاطمة شعيب، بسمة رقايدة وسعدية برقوق...،
وأصدقائي عمار هاشم وعصام بن درداج.
إلى كل من ساعدني في كتابة هذه المذكرة.
إلى كل الأشخاص الذين أحمل لهم المحبة والتقدير.
إلى كل من نسيه القلم وحفظه القلب

وردة

التشكرات

الشكر أولا وأخيرا إلى الله عز و جل الذي كان خير عون لي في هذا البحث فوفقت بفضلته إلى تقديمه على هذه الصورة.

كما أتقدم بخالص الشكر وعظيما الإمتنان للأستاذة الفاضلة المشرفة على مذكري الأستاذة بلة زكية أستاذ محاضر (ب) بجامعة قاصدي مرياح ورقلة، لما بذلته من رحابة صدر وروح عملية وما قدمت لي من توجيهات ونصائح سديدة وملاحظات قيمة فأدمها الله بصحة والعافية ووفقها إلى بلوغ أعل المراتب. كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير والإمتنان للمشرف المساعد خلفاوي فتحي، أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرياح ورقلة الذي لم يدخر جهدا في مساعدتي وتوجيهي وتقديم النصائح الجوهرية.

الشكر أيضا لأعضاء اللجنة المناقشة المشكلة من الأساتذة الأفاضل:

الأستاذة باباحني أم الخير أستاذ تعليم عال بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها ترأس لجنة المناقشة، وكما أشكر الأستاذة لمقدم سومية أستاذ محاضر (ب) بجامعة قاصدي مرياح ورقلة لقبولها مناقشة المذكرة.

وأخير أتقدم بشكر وإمتنان إلى كل أعضاء فريق البحث بمخبر الإشعاع والبلازما وفيزياء السطوح بقسم الفيزياء كلية الرياضيات وعلوم المادة جامعة قاصدي مرياح ورقلة، إلي كل من ساهم ومد لنا يد العون حتى لو بكلمة تشجيع واحدة في إنجاز هذا العمل المتواضع.



فهرس المحتويات

الصفحة	المحتويات
I	الإهداء
II	التشكرات
III	فهرس المحتويات
V	قائمة الأشكال
V	قائمة الجداول
1	مقدمة عامة
الفصل الأول: عموميات حول البلازما والرش المهبطي	
3	1-I تعريف البلازما
3	2-I الخصائص الكهربائية للبلازما
6	3-I الطبقات الرقيقة
8	4-I الرش المهبطي
الفصل الثاني: نموذج الموائع وتطبيقه على بلازما غاز SF₆	
11	1-II - مقدمة
11	2-II - نموذج الموائع
12	1-2-II المعادلات الأساسية لنموذج الموائع
13	2-2-II ظاهرة الإنتشار والحركية للجسيمات المشحونة
14	3-II تطبيق نموذج الموائع
14	1-3-II النموذج الرياضي
16	2-3-II النموذج العددي
21	4-II مخطط برنامج الحساب

الفصل الثالث: النتائج العددية ومناقشتها	
22	III-1- مقدمة
22	III-2- حساب الكثافات في شروط عمل E.Gogolides et E.-H.Sawin
23	III-3- حساب الخصائص الكهربائية في شروط عملنا.
27	خلاصة عامة والآفاق
29	قائمة المراجع

قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	رقم
07	بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية لتوضع الطبقات الرقيقة.	(1-I)
17	رسم تخطيطي لمجال الدراسة.	(1-II)
21	مخطط الحساب العددي للبرنامج.	(2-II)
23	مقارنة بين منحني كثافة الشحنات لنتائجنا بمنحني E. Gogolides et .E.-H. Sawin	(1-III)
24	التغير الموضعي للكثافة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.	(2-III)
24	التغير الموضعي للكثافة الأيونية السالبة لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.	(3-III)
25	التغير الموضعي للكثافة الأيونية الموجبة لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.	(4-III)
25	التغير الموضعي للكمون الكهربائي لمختلف أطوار أزمنة الدور RF.	(5-III)

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	رقم
15	معادلات التفاعل الكيميائية المعتمدة في دراسة.	(1-II)
16	قيم الثوابت الفيزيائية لغاز SF ₆ .	(2-II)
18	الشروط الحدية والإبتدائية المستخدمة في الحساب العددي للخصائص الكهربائية.	(3-II)

مقدمة عامة

مقدمة عامة

تتطور الصناعة التكنولوجية وتتقدم بشكل سريع هذا يعود إلى الدراسات الشاملة والملمة بالعلم، حيث يسعى علماء الإلكترونيات الدقيقة للوصول إلى مواد ذات خصائص إلكترونية جيدة. إذ تعد دراسة المواد المرسبة بشكل طبقات رقيقة إحدى الوسائل المناسبة لمعرفة وكذا تحسين العديد من خصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد سألفة الذكر فهي تستخدم في حل المشاكل والعيوب الموجودة في المواد.

حيث يتم عموماً توضع الطبقات الرقيقة في الطور البخاري بطريقتين هما [1]:

✓ التوضع الكيميائي في الطور البخاري (Chemical Vapor Deposition CVD)

✓ التوضع الفيزيائي في الطور البخاري (Physical Vapor Deposition PVD)

تعد طريقة الرش المهبطي من الطرق الفيزيائية الأكثر استعمالاً في توضع الطبقات الرقيقة وهذا نظراً لسرعة توضعها ومردودها الكبيرين [2]، حيث تعتمد أساساً على عملية التفريغ الكهربائي للغاز [3]. سنخص دراستنا على الدراسة النظرية لبلازما غاز SF_6 وتحديد خصائصها الكهربائية (الكثافة الإلكترونية، كثافة الأيونات الموجبة والسالبة، والكمون الكهربائي)، وذلك بتطبيق نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد بإعتماد جهاز الرش المهبطي المغذى بمصدر جهد متناوب RF. حيث أن نموذج الموائع يدرس البلازما باعتبارها مائعاً يتميز بمقادير متوسطة، ويمثلها بجملة معادلات تفاضلية جزئية (معادلة الإستمرارية، معادلة إنحفاظ الطاقة، معادلة تحويل كمية الحركة)، وهي معادلات مشتقة من المعادلة الأصلية لبولتزمان، مكملة مع معادلة بواسون.

ينقسم هذا العمل إلى ثلاثة فصول.

في الفصل الأول سنستعرض لمحة موجزة عن بعض المفاهيم والمقادير الفيزيائية للبلازما، سنتطرق لتقنية توضع الطبقات الرقيقة، حيث سنتحدث بشكل مفصل عن طريقة الرش المهبطي.

الفصل الثاني نقدم فيه نموذج الموائع بالتفصيل، إذ نتطرق لمعادلاته الأساسية وهي معادلة الإستمرارية مكملة بمعادلة بواسون ومعاملات الحركية والإنتشار، وإلى تطبيق طريقة الفروق المنتهية المستعملة للحل العددي والصيغة الآسية لعبارة التدفق، وطريقة توماس للحل البرمجي، وفي الأخير نوضح مخطط سير الحساب العددي لبرنامجنا.

سنعرض في الفصل الثالث مقارنة نتائجننا بنتائج بحثين آخرين ثم نعرض النتائج المتحصل عليها للمنحنيات الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية الموجبة والسالبة والكمون الكهربائي بواسطة برنامج المحاكاة العددي. ننهي هذا الفصل بمناقشة هاته النتائج.

في ختام المذكرة خلاصة عامة سنستعرض فيها أهم ما ورد في الفصول السابقة مع بعض النتائج بإضافة إلى اقتراحات لأفكار أو آفاق مستقبلية لموضوع المذكرة.



الفصل الأول:
عموميات حول البلازما
والرش المهبطي

الفصل الأول: عموميات حول البلازما والرش المهبطي

1-I تعريف البلازما

تعرف البلازما بأنها الحالة الرابعة للمادة فهي عبارة عن غاز مؤين حيث نحصل عليه عن طريق رفع درجة حرارة الغازات المتعادلة والتي تحتوي بشكل عام على أعداد متساوية من حاملات الشحنة الموجبة والسالبة إلى غاية أن تصل درجة حرارة قريبة من طاقات التأين للذرات أو تتجاوزها عندئذ تأين الذرات معطية إلكترونات سالبة الشحنة وأيونات موجبة وسالبة الشحنة [4]. طبعاً هذه الشحنات هي ليست حرة على أي حال ولكنها تتأثر بشدة الحقول الكهرومغناطيسية الأخرى وتتسم حركتها بالفعل الجماعي [5].

تنقسم البلازما إلى بلازما باردة وحارة لكن سنخص الدراسة على البلازما الباردة التي غالباً ما تكون متأينة جزئياً (ضعيفة التأين) تتراوح درجة حرارتها بين مئات إلى عدة آلاف من الدرجات المئوية وبطاقة حركية مقدارها (1ev) ويطلق عليها اسم التفريغ في الغازات وهي النوع المستخدم في أغلب البحوث العلمية. تكون التوصيلية ضعيفة من ناحية ومن ناحية أخرى لها تفاعلات بين جزيئاتها بسبب الإصطدام وتسمح للمجال المغناطيسي بتسرب خلال البلازما [6]. يمتاز وسط البلازما بعدة خصائص كهربائية تسمح لنا بتفسير الظواهر الفيزيائية كدرجة التأين، درجة حرارة الإلكترونات وتردد البلازما... فيما يأتي سنتطرق للتعريفات الفيزيائية لبعض هذه الخصائص.

1-2- الخصائص الكهربائية للبلازما

1-درجة التأين

تعتبر درجة التأين من الوسائط الأساسية في تصنيف البلازما، وتعرف بأنها النسبة بين كثافة الإلكترونية والكثافة الكلية للبلازما. تصاغ رياضياً بالمعادلة الآتية [7]:

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + n_0} \quad (I-1)$$

n_e : الكثافة الإلكترونية، n_0 : الكثافة الكلية.

في الغازات ضعيفة التأين (البلازما الباردة) تتراوح درجة التأين بين 10^{-6} و 10^{-4} وتحقق

$$\alpha < \alpha_0 \quad (I-2)$$

α_0 : القيمة الحرجة لدرجة التأين.

2- كثافة الجسيمات والدوال التوزيع

كثافة البلازما N لكل من الإلكترونات، الأيونات والجسيمات المحايدة. والتي تعبر عن عدد الجسيمات المتواجدة دخل الحجم معين ويخضع توزيعها لعبارات إحصائية تدعى دوال التوزيع التي تصف بدورها عدد الجسيمات في اللحظة t والموضع بين r و $r+dr$ حيث [8]:

f دالة توزيع في الزمن والموضع والسرعة حيث:

$$f \equiv f(t; r; v) \quad (I-3)$$

يمكن أن تخضع هذه الجسيمات إلى ثلاث أنواع من دوال التوزيع:

توزيع فيرمي ديراك

توزيع بوز-انشتاين

توزيع ماكسويل بولتزمان

إذا كان الغاز في حالة توازن ترموديناميكي وطاقة التفاعل بين الجسيمات مهمة أمام الطاقة الحركية فإن الجسيمات تخضع لتوزيع ماكسويل بولتزمان، التي تعبر عن التصادمات أثناء الحركة العشوائية وتكتب دالة توزيع السرعات في هذه الحالة كالآتي [9]:

$$f = \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(\frac{-mv^2}{2K_B T} \right) \quad (I-4)$$

حيث:

K_B : ثابت بولتزمان؛ T : درجة الحرارة؛ m : كتلة الجسيم.

3- درجة حرارة الإلكترونات T_e

تمتلك الإلكترونات أقل كتلة مقارنة بالجسيمات الأخرى المتواجدة داخل لبلازما مما يجعلها سريعة الحركة وبهذا الأكثر فعالية في تأين البلازما لذلك تعتبر درجة حرارتها أكثر

أهمية مقارنة بدرجة حرارة الجسيمات الأخرى المتواجدة داخل وسط البلازما في نظام متوازن ترموديناميكي درجة حرارة الإلكترونات تحقق المعادلة الآتية [10]:

$$E_c = \frac{1}{2} m_e \langle V \rangle^2 = \frac{3}{2} K_B T_e \quad (I-5)$$

حيث:

E_c : الطاقة الحركية.

m_e : كتلة الإلكترون.

V : سرعة الإلكترون.

T_e : درجة حرارة الإلكترونات بالكلفين.

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

4-كمون البلازما V_e

كمون البلازما وهو الكمون الكهربائي الساكن المتوسطي لحاملات الشحنة ويكون موجب بالنسبة لجدران الغرفة المحيطة بالبلازما. إن حيادية البلازما تؤدي إلى إنعدام الحقل الكهربائي، مما يجعل الكمون الكهروستاتيكي لحاملات الشحنة ثابتا في قلب البلازما.

5-تردد البلازما ω_p

إن وجود الإلكترونات ضمن المجالات الكهروستاتيكية للأيونات الموجبة في البلازما سوف يفترض بعض التحديدات على حركة سيل الإلكترونات والأيونات. فلا بد من حدوث إهتزازات في البلازما نتيجة لوجود القوى الكهروستاتيكية العاملة بين الشحنات الموجبة والسالبة والتي تحاول إعادة البلازما إلى وضع الاستقرار عند التأثير بأي مؤثر يحاول الإخلال بهذا الإستقرار، فعند تصادم الجسيمات المشحونة مع الذرات المتعادلة عندها

تتسبب الأخيرة بتذبذب الجسيمات المشحونة بتردد معين يعتمد على القوى الهيدروديناميكية والكهرومغناطيسية الموجود. وهذا التردد يعطي بالعلاقة الآتية [11]:

$$\omega_p = \left(\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m} \right)^{1/2} \quad (I-6)$$

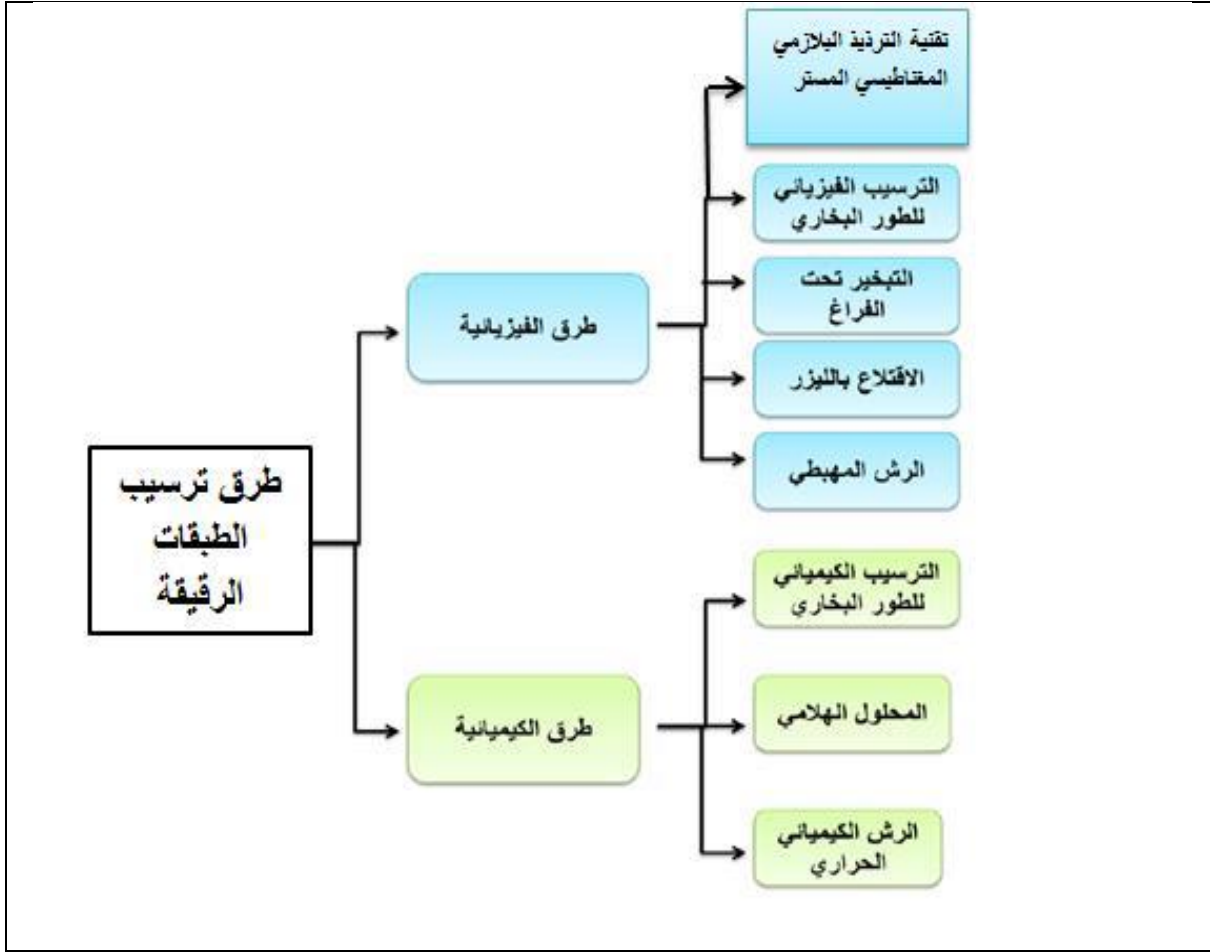
هذا التردد في جهاز الرش المهبطي المتناوب RF يعطي في أغلب الأحيان للإلكترونات لأن تردد الأيونات الموجبة يكون قليل مقارنة بتردد الإلكترونات كون كتلتها تكون كبيرة مقارنة بكتلة الإلكترونات.

I-3- الطبقات الرقيقة

I-3-1 تعريف الطبقات الرقيقة

الشرائح أو الأغشية الرقيقة هي عبارة عن طبقة أو عدة طبقات من ذرات مادة ما التي تترسب على سطح ركيزة أو قاعدة مشكلة طبقات رقيقة ذات سمك في حدود $1\mu\text{m}$ [12]، ومن حيث المبدأ الطبقات الرقيقة لمادة معينة هو ترتيب لعناصر هذه المادة في بعدين (مستوي) بحيث يكون البعد الثالث صغير جدا. كما أن الطبقة الرقيقة مهما اختلفت الطرق المستخدمة في الحصول عليها تكون دوما على تكاثف [13].

توجد تقنيات مختلفة لتوضع الطبقات الرقيقة يمكن تقسيمها إلى نوعان رئيسيين كما هي موضحة في شكل (I-1).



الشكل (I-1): مخطط يوضح بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية لتوضع الطبقات [14]

I-3-2 طرق توضع الطبقات الرقيقة

يتم عموماً توضع الطبقات الرقيقة بالطور البخاري بطريقتين هما:

1- طريقة التوضع الكيميائي للطور البخاري (CVD: Chemical Vapor Déposition)

تعتمد هذه الطريقة على التفاعل الكيميائي لمكونات الغاز لتتشكل أغشية صلبة فوق مساحة تسمى المسند (الركيزة)، وبهذا تتكون طبقات رقيقة لا متطايرة فوق الركيزة حيث تتحكم في هذه الطريقة عدة وسائط كالضغط، درجة الحرارة... وتصنف إلي [15]:

✓ CVD.

✓ الليزر CVD (PECVD)

✓ البلازما CVD (LPCVD)

2- طريقة التوضع الفيزيائي للطور البخاري (PVD: Physical Vapor Déposition)

تعتمد تقنية التوضع الفيزيائي للطور البخاري على عملية إقتلاع للمواد تحت الضغوط المنخفضة، ولها عدة مميزات مقارنة بطريقة CVD فهي غير ملوثة كما أن الطبقات المتوضعة تكون كثيفة وسهلة المراقبة. ونميز منها ثلاث تقنيات صنفت حسب طريقة الحصول على بخار المادة وتقنية تكثيف البخار هي [16]:

✓ التبخير الحراري تحت الفراغ.

✓ الترسيب الأيوني.

✓ الرش المهبطي.

تعتبر طريقة الرش المهبطي من بين طرق التوضع البخاري للطور الفيزيائي الأكثر إستعمالاً، وهي الطريقة المعتمدة فيعملنا هذا، والتي سوف نتطرق إليها بتفصيل في الفقرة الآتية:

I-4 الرش المهبطي

تم اكتشاف ظاهرة الرش في عام 1852 من قبل العالم Grove [17]. وقام بتطبيقها تجريبياً باستخدام التفريغ الكهربائي بين لبوسين ناقلين (مصعد ومهبط)، يفصل بينهما فراغ يحتوي على غاز خامل في ضغط منخفض.

1-المبدأ العام لرش المهبطي

في هذه الطريقة يتم وضع الركيزة داخل غرفة ضغطها منخفض تحوي غاز خامل غالباً ما يستخدم غاز الأرجون، بسبب هذا الضغط المنخفض يحدث تفريغ شحني، هذا التفريغ يلعب دوراً كبيراً في تأين الغاز، حيث تسرع الأيونات النابذة بواسطة فرق الكمون لتصطدم بالمهبط بطاقة كبيرة ويسمى هذا الأخير بالهدف لتقلع ذراته وتتوضع على سطح المصعد (الركيزة). في بعض الحالات يتم إدخال غاز ثاني بالإضافة إلى الأرجون بحيث يتفاعل كيميائياً مع الذرات المقتلعة لتشكل معها مركبات أخرى [14].

تتميز هذه الظاهرة بالمرود S والذي يمثل النسبة بين الذرات المقتلعة والذرات الواردة [9].

$$S = \frac{\text{عدد الذرات المقتلعة}}{\text{عدد الذرات الواردة}} \quad (\text{I-7})$$

يتعلق هذا المرود بالمعاملات التالية:

- ✓ طبيعة الهدف (المادة وحالة السطح)
- ✓ طبيعة الأيونات الواردة (أيونات غاز نادر أو غاز فعال)
- ✓ طاقة الأيونات الواردة
- ✓ زاوية الورود

2-أنواع الرش المهبطي

يوجد طريقتين لرش وذلك حسب الجهد المطبق على المهبط هما:

أ-الرش المهبطي ال مستمر DC

يستعمل الرش المهبطي المستمر عندما تكون الركيزة ناقلة أو نصف ناقلة حيث يطبق على المهبط جهد مستمر وسالب الذي يسمح هذا الأخير بتأين ذرات الغاز وجذبها نحو المهبط لتقوم بنزع ذراته وترسبها فوق المسند مشكلة طبقة رقيقة.

ب-الرش المهبطي المتناوب RF

عندما تكون مادة الهدف عازلة لا يمكن تطبيق رش مستمر وذلك لان الشحنات القادمة مع الأيونات لا يمكنها الانفصال. يمكن التخلص من ظاهرة التصاق الشحنات بمادة الهدف العازلة بتطبيق فرق جهد متناوب يحدث إستقطاب متناوب لمادة الهدف يجعله تارة جاذب للأيونات خلال نصف الإهتزازة سالبة، إلى أن يشحن بكمون موجب مما يؤدي إلى توقيف عملية الجذب للأيونات وبالتالي عملية الرش، ويجعله جاذب للإلكترونات تارة أخرى خلال نصف الإهتزازة الموجبة إلى أن تتعادل مع الشحنات الموجبة المتوضعة سابقا على سطح الهدف [18].

تصنف الترددات الإستقطاب المتناوب لمادة الهدف إلى صنفين:

✓ الترددات الضعيفة.

✓ الترددات العالية.

الفصل الثاني:
نموذج المواع وتطبيقه
على بلازما غاز SF_6

الفصل الثاني: نموذج الموائع وتطبيقه على بلازما غاز SF₆

II-1- مقدمة

يتم عموماً دراسة البلازما لتحديد خصائصها الكهربائية كالكتافة الإلكترونية، الكتافة الأيونية، الحقل الكهربائي، الكمون الكهربائي، درجة الحرارة الإلكترونية وغيرها من الخصائص إما تجريبياً وهذا بتشخيص البلازما بواسطة طرق التشخيص المتمثلة في مطيافية الانبعاث الضوئي، مطيافية الإمتصاص الضوئي ومسبار لونغمير أو نظرياً عن طريق نمذجتها بإحدى الطرق الآتية: النموذج الجزيئي، النموذج الهجين ونموذج الموائع. وإخترنا في دراستنا نموذج الموائع الذي سنتطرق إليه بأكثر تفاصيل في الفقرات الآتية ثم سنقوم بتطبيق نموذج الموائع لنظام مرتبط بزمن ولبعد واحد لبلازما غاز SF₆ المستعملة في جهاز الرش المهبطي المتناوب RF.

II-2- نموذج الموائع

لدراسة بلازما التفريغ الكهربائي بنموذج الموائع نهتم بتحديد القيم المتوسطة لبعض المقادير الفيزيائية الخاصة بالجسيمات المشحونة كالكتافة، السرعة المتوسطة والطاقة المتوسطة. نموذج الموائع هو عبارة عن جملة معادلات تفاضلية للإشتقاقات جزئية تحدد بالعزوم الثلاثة لمعادلة بولتزمان حيث تمثل الكتافة بمعادلة الإستمرارية، السرعة المتوسطة بمعادلة حفظ كمية الحركة، بينما الطاقة المتوسطة للإلكترونات بمعادلة حفظ الطاقة حيث يتم حل جملة هذه المعادلات بطرق عديدة مختلفة: طريقة الفروق المنتهية، طريقة العناصر المنتهية والحجوم المنتهية [4].

II-2-1 المعادلات الأساسية لنموذج الموائع

1- معادلة الإستمرارية

معادلة الإستمرارية هي بمثابة قانون إنحفاظ الشحنة يكتب بالنسبة لكل عنصر

(إلكترون وأيون) في الوسط الغازي أو المائع بالشكل الآتية [19]:

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

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

حيث:

$n_{e,i}$: كثافة الجسيمات المشحونة بالإلكترونات والأيونات (الموجبة والسالبة)

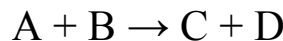
$D_{e,i}$: معامل الانتشار للإلكترونات والأيونات (الموجبة والسالبة).

V : الكمون الكهربائي.

$J_{e,i}$: كثافة تدفق الإلكترونات والأيونات (الموجبة والسالبة).

$$\begin{cases} S = -1 & \text{الإلكترونات السالبة والأيونات} \\ S = +1 & \text{الموجبة الأيونات} \end{cases}$$

$S_{e,i}$: عبارة مصدر تعطى وفق معادلة التفاعل الآتية [20][21]:



عبارة المصدر للجسيمات في مثل هذا التفاعل هي:

$$S_{\text{réac},C} = S_{\text{réac},D} = -S_{\text{réac},A} = -S_{\text{réac},B} = K_{\text{réac}} n_B n_A$$

حيث $K_{\text{réac}}$ ثابت التفاعل ويكتب بالشكل العام كآتي:

$$K = \alpha T^\beta \exp\left(\frac{-\delta}{T}\right) \quad (\text{II-3})$$

حيث: α ، β و δ ثوابت مرتبطة بالتفاعل الكيميائي.

2- معادلة بواسون

تكتب معادلة بواسون كآتي [9]:

$$\Delta V = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_{ip} - n_{in} - n_e) \quad (\text{II-4})$$

II-2-2 ظاهرة الإنتشار والحركة للجسيمات المشحونة

بفعل الحركة العشوائية والتصادمات التي تحدث بين الجسيمات الحيدية والمشحونة تتغير سرعتها وطاقتها مما يؤدي إلى إحداث خلل في توازن توزيع كثافة بلازما. ونظرا لسعي البلازما أن تكون دائما متزنة فتعود إلى حالة الإتزان عن طريق ظاهرة الإنتقال التي هي الحركية وظاهرة الإنتشار [4].

1. ظاهرة الإنتشار

تعرف ظاهرة الإنتشار بأنها عملية تسوية التوزيع الإتزاني للتركيز داخل البلازما وتتميز جميع الجسيمات بمعامل خاص بها يسمى معامل الإنتشار [17].

أ. معامل الإنتشار الإلكتروني D_e

يعطى معامل الإنتشار الإلكتروني حسب النظرية الحركية للغازات في غياب الحقل المغناطيسي بالقيمة السلمية الآتية [22]:

$$D_e = \frac{K_B T_e}{m_e v_m} \quad (\text{II-5})$$

v_m : تردد تصادم الجسيمات.

ب. معامل الانتشار الأيوني D_i

يعطى معامل الانتشار الأيوني بالقيمة سلمية المصاغة بالمعادلة الآتية [23]:

$$D_i = \frac{K_B T_i}{m_i v_m} \quad (II-6)$$

2. ظاهرة الحركية

معامل الحركية ويسمى أيضا معامل الانتقال يمثل متوسط الحركة أو الانحراف لجسيمات المشحونة (إلكترون، أيون) الواقعة تحت تأثير حقل كهربائي سواء كان حقل خارجي أو داخلي [4].

أ. الحركية الإلكترونية μ_e

تتحرك الإلكترونات حركة إنسحابية تحت تأثير المجال الكهربائي في الإتجاه المعاكس لإتجاهه وتتميز بمعامل حركية يعطى بالعلاقة [9]:

$$\mu_e = \frac{e}{m_e v_m} \quad (II-7)$$

ب. الحركية الأيونية μ_i

معامل الحركية الأيونية يعطى أحيانا كدالة للحقول الكهربائية المنخفضة، في أغلب الأحيان تعتبر الحركية الأيونية قيمة ثابتة حيث [24]:

$$\mu_i = \frac{e}{m_i v_m} \quad (II-8)$$

3. علاقة أينشتاين

العلاقة بين معامل الانتشار والحركية تسمى بعلاقة أينشتاين وهي نسبة بين معامل الانتشار ومعامل الحركية وتكتب بالصيغة الآتية [25]:

$$\frac{D_{e,i}}{\mu_{e,i}} = \frac{K_B T_{e,i}}{e} \quad (II-9)$$

II-3 تطبيق نموذج الموائع

II-3-1 النموذج الرياضي

من أجل التحديد الرياضي للخصائص الكهربائية لبلازما غاز SF₆ سداسي الفلورايد الكبريت (Sulfur hexafluoride) المستعمل في توضع الطبقات الرقيقة بتقنية الرش المهبطي سنقوم بتطبيق نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد Z الذي يعتمد على معادلات أساسية الآتية:

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \frac{\partial J_s}{\partial z} = S_{e,i} \quad (\text{II-10})$$

$$\begin{cases} J_e = +\mu_e n_e \frac{\partial V}{\partial Z} - D_e \frac{\partial n_e}{\partial Z} \\ J_{ip} = -\mu_{ip} n_{ip} \frac{\partial V}{\partial Z} - D_{ip} \frac{\partial n_{ip}}{\partial Z} \\ J_{in} = -\mu_{in} n_{in} \frac{\partial V}{\partial Z} - D_{in} \frac{\partial n_{in}}{\partial Z} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_{ip} - n_{in} - n_e) \quad (\text{II-12})$$

باعتبار وسط بلازما سداسي فلورايد الكبريت SF₆ يتكون من الأيونات الموجبة SF₃⁺ والأيونات السالبة SF₅⁻ والإلكترونات e تنتج هذه العناصر وفق التفاعلات المدونة في الجدول الآتي [26]:

الجدول (II-1): معادلات التفاعل الكيميائية المعتمدة في دراسة.

التفاعل	ثابت التفاعل (cm ⁻³)
SF ₆ + e ⁻ → SF ₃ ⁺ + 3F + 2e ⁻	K ₁ = 3,2 × 10 ⁻⁸ × exp(-20,7/T _e)
SF ₆ + e ⁻ → SF ₅ ⁻ + F	K ₂ = 2,3 × 10 ⁻¹⁰
SF ₃ ⁺ + SF ₅ ⁻ → SF ₃ + SF ₅	K ₃ = 10 ⁻⁷

نلخص في الجدول (2-II): قيم الثوابت الفيزيائية لغاز SF₆ [27].

الجدول (2-II): قيم الثوابت الفيزيائية لغاز SF₆.

المقدار	القيمة	الوحدات
$\mu_e \times P$	14×10^4	(cm ² Torr /Vs)
$D_e \times P$	100×10^4	(cm ² Torr /s)
$m_i (SF_3^+)$	89.05	(uma)
$\mu_p \times P$	5×10^2	(cm ² Torr /Vs)
$D_p \times P$	13	(cm ² Torr /s)
$m_i (SF_5^+)$	127.05	(uma)
$\mu_n \times P$	5×10^2	(cm ² Torr /Vs)
$D_n \times P$	13	(cm ² Torr /s)
T_e	7.143	(eV)
Pg	1	(Torr)
f	13.56×10^6	(Hz)
d	3	(cm)

II-3-2-النموذج العددي

بهدف الحصول على القيم العددية للمقادير الفيزيائية التي نحن بصدد حسابها عند كل نقطة من الفضاء وعند كل لحظة زمنية سنقوم بتطبيق طريقة الفروق المنتهية لسهولة إستعملها. تعتمد طريقة الفروق المنتهية على الخطوات الرياضية الآتية:

أ- تقريب المشتقات الجزئية بطريقة الفروق المنتهية

بعد تطبيق تعريف المشتقات الجزئية حسب طريقة الفروق المنتهية (k من أجل الزمن و z من أجل الموضع)، نصوغ معادلة الإستمرارية ومعادلة بواسون كما يلي:

$$\left(\frac{n_j^{k+1} - n_j^k}{\Delta t} \right) + \left(\frac{J_{j+1/2}^{k+1} - J_{j-1/2}^{k+1}}{\Delta z} \right) = S_j^k \quad (II-13)$$

$$\frac{v_{j+1}^{k+1} - 2v_j^{k+1} + v_{j-1}^{k+1}}{\Delta z^2} = \frac{-e}{\epsilon_0} (n_{ipj}^k - n_{inj}^k - n_{ej}^k) \quad (II-14)$$

بتطبيق الصيغة الآسية على عبارة التدفق في الموضعين $J_{j+1/2}$ و $J_{j-1/2}$ عند الزمن

t_{k+1} نجد [28]:

$$J_{j+1/2}^{k+1} = \frac{1}{\Delta Z} [n_j^{k+1} D \exp(Z_{j+1/2}) - n_{j+1}^{k+1} D] \frac{Z_{j+1/2}}{\exp(Z_{j+1/2}-1)} \quad (\text{II-15})$$

$$J_{j-1/2}^{k+1} = \frac{1}{\Delta Z} [n_{j-1}^{k+1} D \exp(Z_{j-1/2}) - n_j^{k+1} D] \frac{Z_{j-1/2}}{\exp(Z_{j-1/2}-1)} \quad (\text{II-16})$$

علما أن D هي معامل إنتشار الجسيمات ومنه:

$$\frac{n_j^{k+1} - n_j^k}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta Z^2} \left\{ [n_j^{k+1} D \exp(Z_{j+1/2}) - n_{j+1}^{k+1} D] \frac{Z_{j+1/2}}{\exp(Z_{j+1/2}-1)} - [n_{j-1}^{k+1} D \exp(Z_{j-1/2}) - n_j^{k+1} D] \frac{Z_{j-1/2}}{\exp(Z_{j-1/2}-1)} \right\} = (S_{k,j}) \quad (\text{II-17})$$

علما أن:

$$Z_{j+1/2} = -S \frac{\mu}{D} [V_{j+1}^{k+1} - V_j^{k+1}] \quad (\text{II-18})$$

$$Z_{j-1/2} = -S \frac{\mu}{D} [V_j^{k+1} - V_{j-1}^{k+1}] \quad (\text{II-19})$$

علما أن μ هو معامل الحركية لجسيمات.

بالنسبة للأيونات الموجبة: $S=1$

بالنسبة للإلكترونات والأيونات السالبة: $S=-1$

ومنه نحصل على المصفوفة التالية:

$$A_{j-1} n_{k,j-1} + A_j n_{k+1,j} + A_{j+1} n_{k+1,j+1} = B_j \quad (\text{II-20})$$

حيث:

$$A_{j+1} = \frac{D Z_{j+1/2}}{\Delta Z^2 (1 - \exp(Z_{j+1/2}))} \quad (\text{II-21})$$

$$A_j = \frac{1}{\Delta t} + \frac{D \exp(Z_{j+1/2}) Z_{j+1/2}}{\Delta Z^2 (\exp(Z_{j+1/2}) - 1)} + \frac{D Z_{j-1/2}}{\Delta Z^2 (\exp(Z_{j-1/2}) - 1)} \quad (\text{II-22})$$

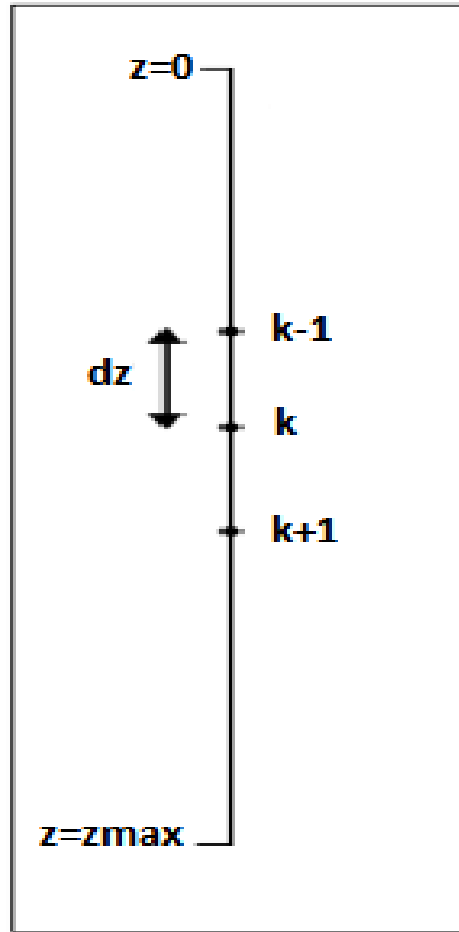
$$A_{j-1} = \frac{D Z_{j-1/2} \exp(Z_{j-1/2})}{\Delta Z^2 (\exp(Z_{j-1/2}) - 1)} \quad (\text{II-23})$$

$$B_j = S_{k,j} \quad (\text{II-24})$$

ب- تجزئة مجال الدراسة

نقوم بتقسيم مجال المحاكاة ما بين لبوسين إلى J_{max} نقطة حيث نعرف خطوة الانتقال من النقطة إلى الأخرى بالمقدار dz :

$$dz = \frac{z}{J_{max} - 1}$$



الشكل (II-1): رسم تخطيطي لمجال الدراسة

ج-الشروط الحدية والإبتدائية

إعتمدنا على مستوى اللبوسين الشروط الحدية والإبتدائية المدونة في الجدول الآتي:
الجدول(II-3): الشروط الحدية والإبتدائية المستخدمة في الحساب العددي للخصائص الكهربائية.

الشروط الإبتدائية [22]	الشروط الحدية [27]		
	المهبط (z = d)	المصعد (z = 0)	
$10^7 + 10^9(1 - z/d)^2(z/d)^2 \text{cm}^{-3}$	$\frac{\partial n_{\text{SF}_3^+}}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial n_{\text{SF}_3^+}}{\partial z} = 0$	$n_{\text{SF}_3^+}$
$10^7 + 10^9(1 - z/d)^2(z/d)^2 \text{cm}^{-3}$	$n_{\text{SF}_5^-} = 0$	$n_{\text{SF}_5^-} = 0$	$n_{\text{SF}_5^-}$
$10^7 + 10^9(1 - z/d)^2(z/d)^2 \text{cm}^{-3}$	$n_e = 0$	$n_e = 0$	n_e
/	$V = V_{\text{RF}} \cos 2\pi ft$	$V = 0$	V

إن الحل التزامني لجملة معادلات نموذج الموائع ونظرا لتشكّل نظام ثلاثي الأقطار (المعادلة (II-12) و (II-20)) إختارنا للحل البرمجي الطريقة التكرارية خوارزمية توماس والتي ينص مبدأها على ما يلي [29]:

لدينا جملة المعادلات الآتية:

$$\begin{cases} b_1 x_1 + c_1 x_2 = d_1 \\ a_i x_{i-1} + b_i x_i + c_i x_{i+1} = d_i \quad i = 2, \dots, imax - 1 \\ a_{imax} x_{imax-1} + b_{imax} x_{imax} = d_{imax} \end{cases}$$

حسب الشروط الحدية تكون قيمة كل من X_1 و X_{imax} معلومة 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:

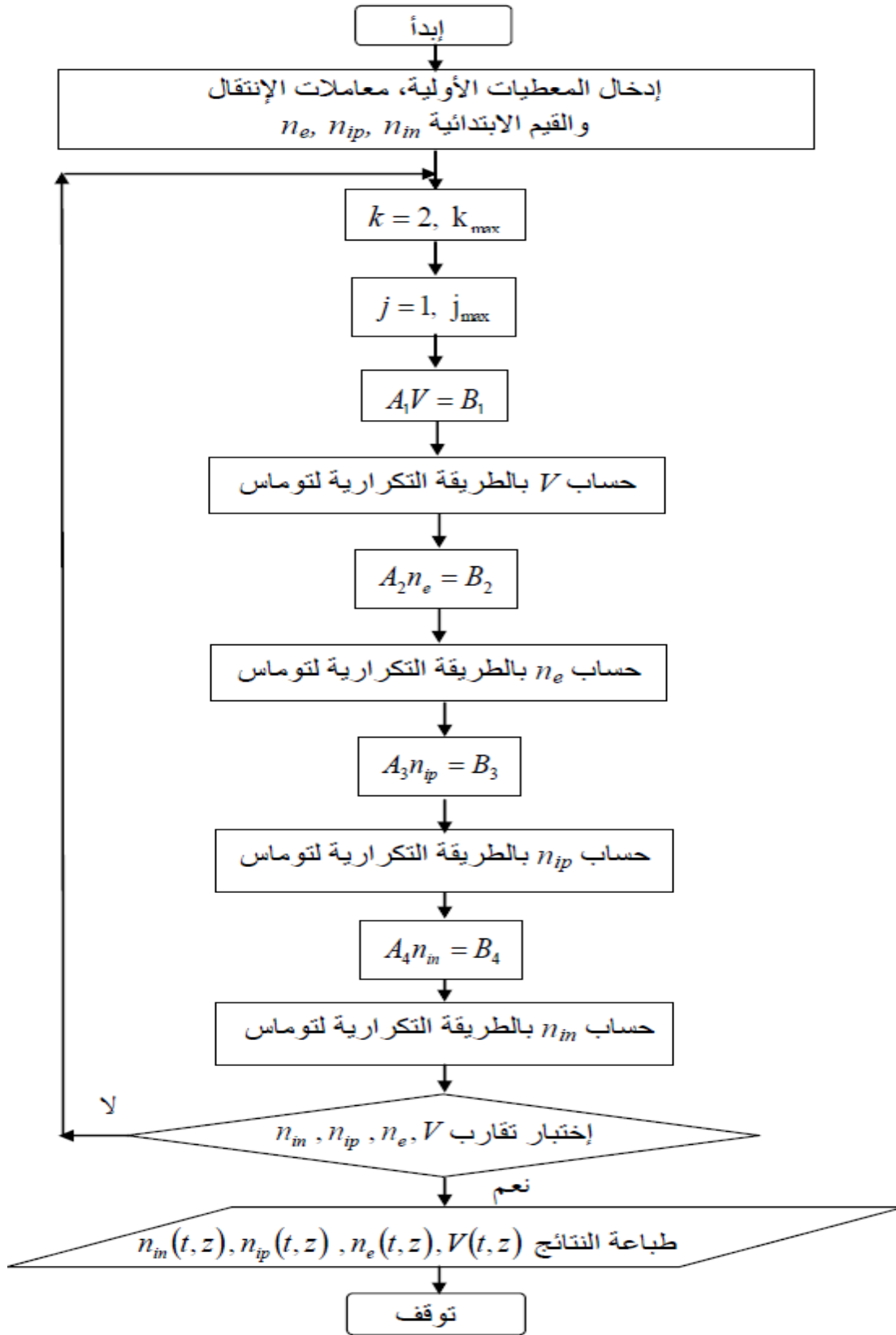
$$x_{imax} = \beta_{imax}$$

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

II - 4 مخطط برنامج الحساب

أنجزنا لحل المسألة برنامج بلغة الفورترون الذي يعتمد على المخطط الموضح في

الشكل الشكل (2-II).



الشكل (2-II): مخطط الحساب العددي

الفصل الثالث:
النتائج العددية
ومناقشتها

الفصل الثالث: النتائج العددية ومناقشتها

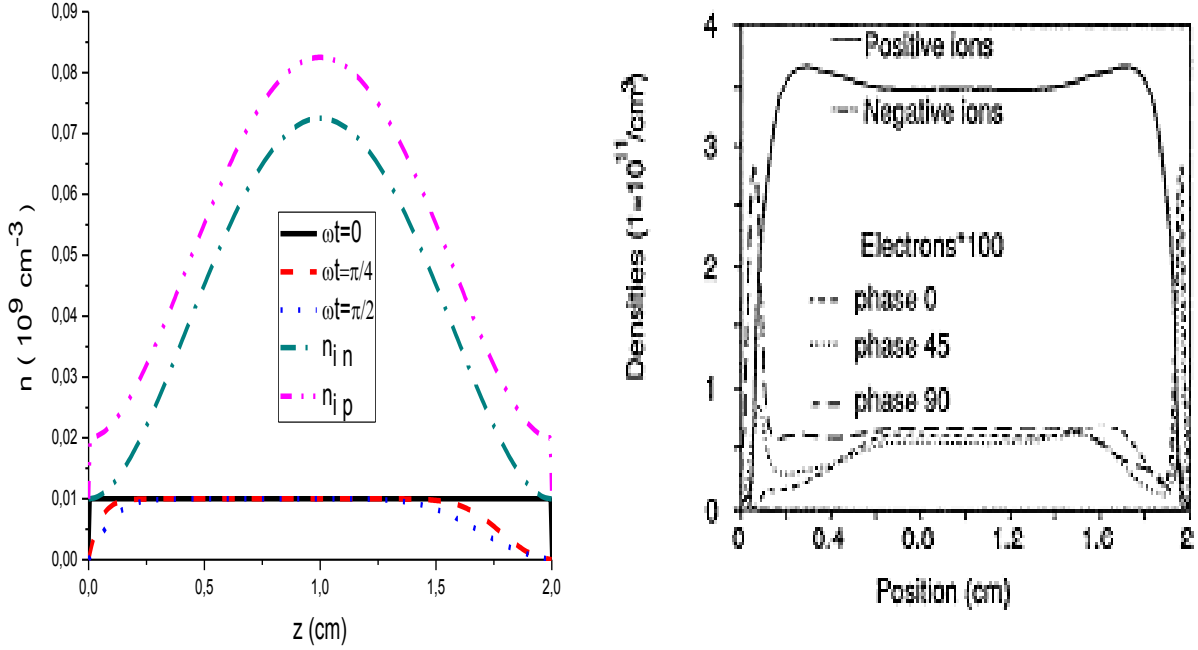
III-1- مقدمة

قمنا في هذا العمل بحساب الخصائص الكهربائية لبلازما غاز SF_6 المستعملة لتوضع الطبقات الرقيقة بالرش المهبطي المغذي بالتيار المتناوب المذياعي RF13,56 Mhz. حيث قمنا بتطبيق نموذج المواع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد، الذي يعتمد على معادلة الإستمرارية للإلكترونات والأيونات الموجبة والسالبة، مكملة بمعادلة بواسون لإيجاد الكمون الكهربائي، حيث أن الطرف الثاني لمعادلة الإستمرارية متعلق بالكثافات الإلكترونية والأيونية الموجبة والسالبة وكذا كثافة الغاز (جسيمات حيادية). وذلك من خلال إنجاز برنامج بلغة الفورترن لحساب الخصائص الكهربائية للبلازما.

III-2- حساب الكثافات في شروط عمل E.Gogolides et E.-H.Sawin

عند تطبيقنا لنفس الظروف التجريبية المنجزة من طرف E. Gogolides et E.- Sawin [27] وهي البعد بين اللبوسين $d=2cm$ ، ضغط غرفة التفريغ $P=1Torr$ وفرق الجهد المطبق على المهبط $V_{RF}=-350V$ خلال مختلف اللحظات الزمنية لدورة التردد المذياعي RF13,56Mhz على برنامجنا تبينا لنا أن منحنياتنا ومنحنيات العمل المقارن به تأخذ نفس السلوك عموما وذلك بالنسبة لمنحنى الكثافة الإلكترونية أو الأيونية الموجبة أو السالبة لكن بالنسبة للكثافة الإلكترونية فيكون التوافق في النتائج كبير في قلب البلازما الموضح في الشكل (III-1)، أما على مستوى العمدين نلاحظ إختلاف في منحنيات حيث ترتفع الكثافة الإلكترونية بشكل كبير وذلك عند الموضعين (1.8cm-0.1cm) وهذا مالا نلاحظه في منحنياتنا يرجع هذا الإختلاف لعدة عوامل منها أننا في برنامجنا أخذنا درجة حرارة الإلكترونات ثابتة و قيمتها (7.143eV)، ولكن العمل المقارن به إعتد درجة حرارة الإلكترونات متغيرة، وكذا في الشروط الإبتدائية عند اللحظة الزمنية $wt=0$ أخذنا قيمة

محسوبة وثابتة دون إعادة برمجتها وحسابها في كل مرة وهذا ما يفسر الإختلاف بالقرب من الغمد المهبطي و الغمد المصعدي.

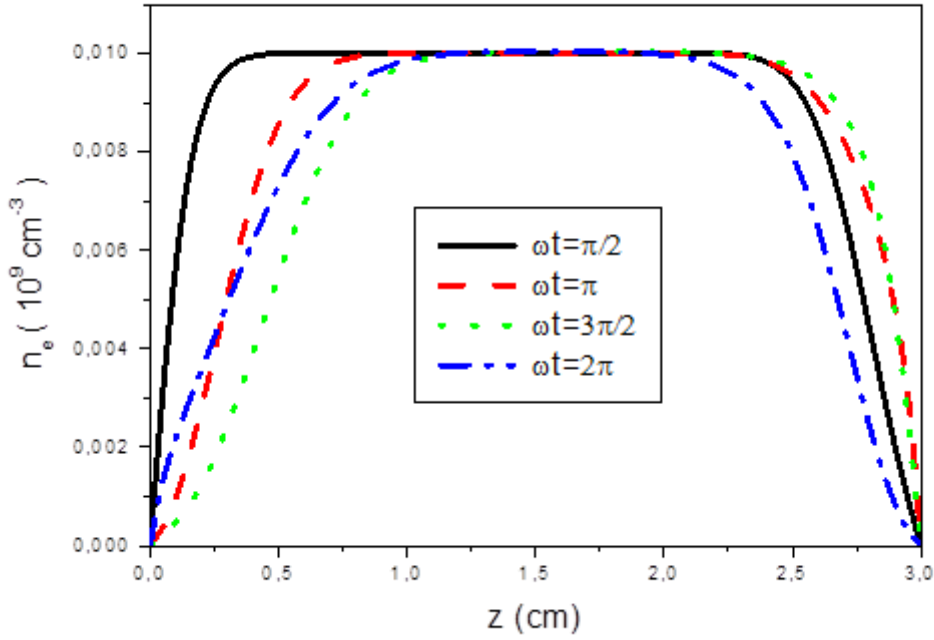


الشكل (III-1): مقارنة بين منحنى كثافة الشحنات لنتائجنا بمنحنى

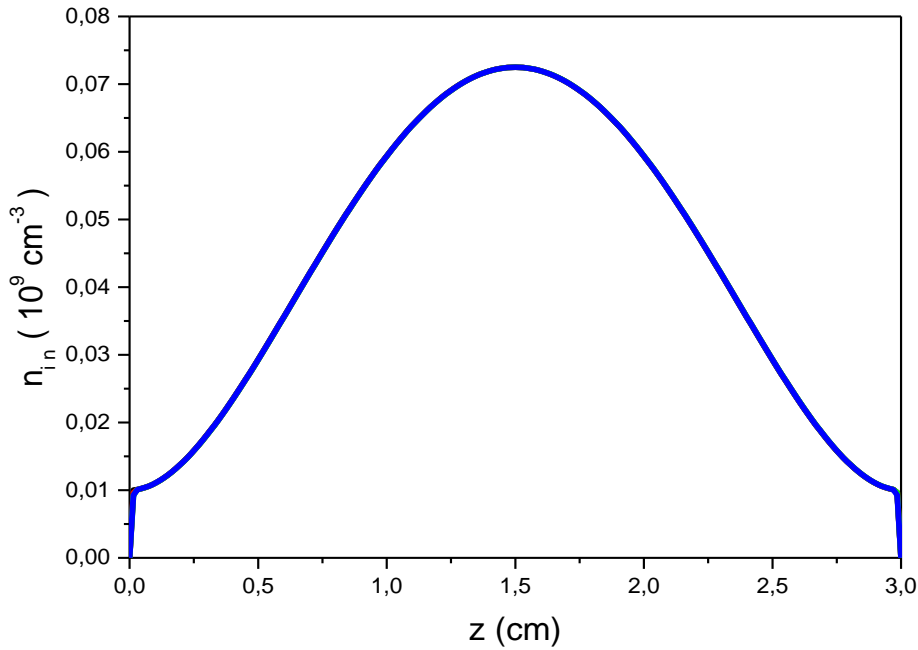
Sawin

III-3- حساب الخصائص الكهربائية في شروط عملنا

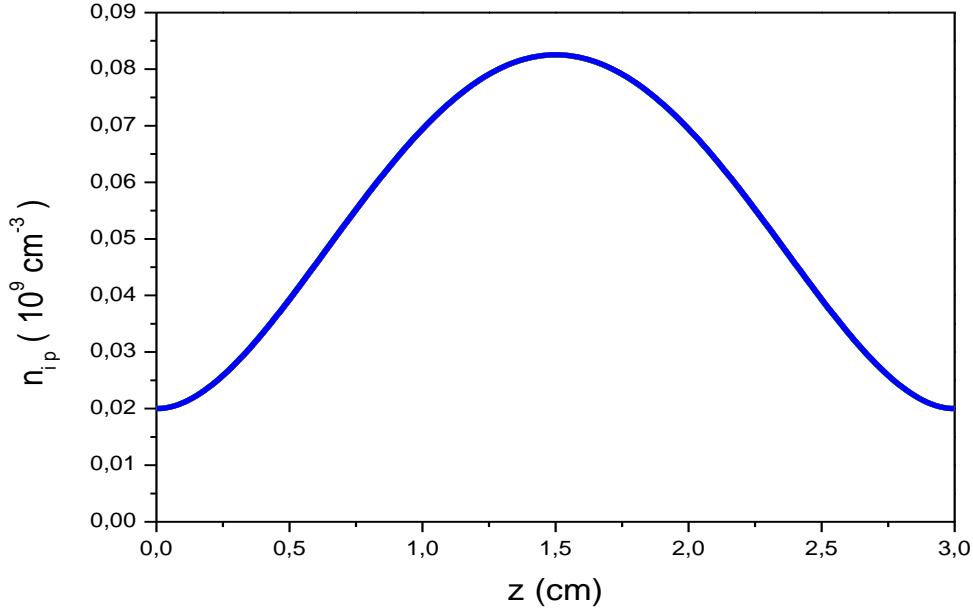
بعد المقارنة التي أجريناها وباعتبار وسط بلازما SF_6 يتكون فقط من إلكترونات وأيونات موجبة وهي: SF_3^+ وإيونات سالبة وهي: SF_5^+ قمنا بتطبيق الشروط التجريبية فرق الجهد المطبق على اللبوس المهبطي $V_{\text{RF}} = -300 \text{ V}$ ، ضغط غرفة التفريغ $P = 1 \text{ Torr}$ ، والبعد بين اللبوسين $d = 3 \text{ cm}$ الذي نعتبره صغير أمام قطر اللبوس. النتائج المتحصل عليها لتوزيع الموضعي للخصائص الكهربائية للبلازما SF_6 : الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية الموجبة والسالبة والكمون الكهربائي خلال مختلف اللحظات الزمنية لدورة RF 13,56Mhz موضحة في الأشكال الآتية:



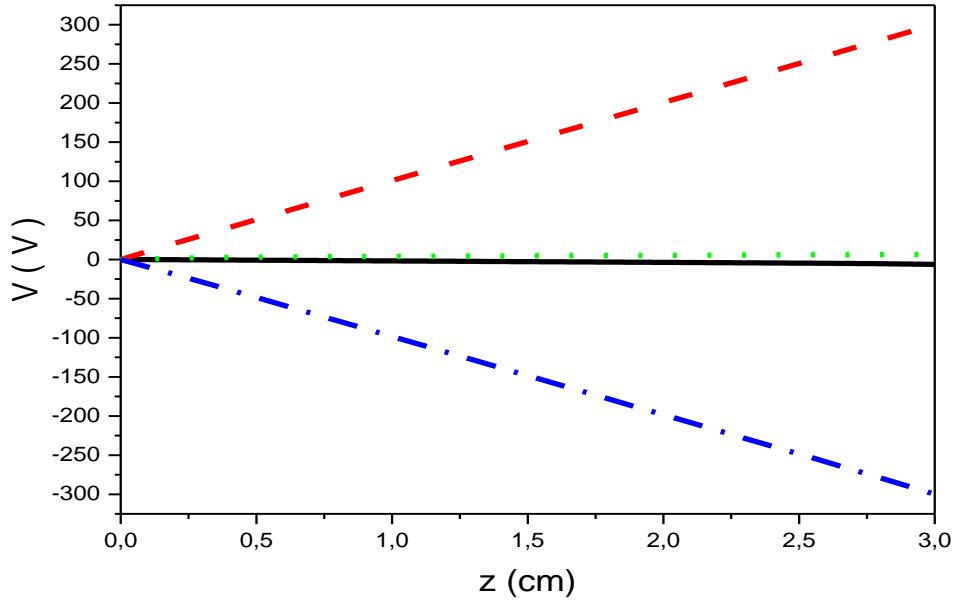
الشكل (III-2): التغير الموضعي للكثافة الإلكترونية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF



الشكل (III-3): التغير الموضعي للكثافة الأيونية السالبة لمختلف أطوار أزمنة الدور RF




الشكل (III-4) التغير الموضعي للكثافة الأيونية الموجبة لمختلف أطوار أزمنة الدور RF



الشكل (III-5): التغير الموضعي للكثافة الكهربيية لمختلف أطوار أزمنة الدور RF

نلاحظ من المنحنى أن الكثافة الإلكترونية الموضح في الشكل (III-2) تزداد تدريجيا كلما إبتعدنا من المصعد إلى أن تستقر عند القيمة $(0.01 \times 10^{+9} \text{cm}^{-3})$ والتي تثبت عندها داخل وسط البلازما، ثم تتناقص كلما إقتربنا من المهبط. وهو نفس سلوك منحنى الكثافة الأيونية الموجبة والسالبة الموضحة في الشكل (III-3) و (III-4) على التوالي. إلا أن الكثافة الأيونية الموجبة تستقر عند القيمة عظيمة $(0.008 \times 10^{+9} \text{cm}^{-3})$ ، أما منحنى الكثافة الأيونية السالبة فتستقر عند القيمة العظيمة $(0.007 \times 10^{+9} \text{cm}^{-3})$ داخل وسط البلازما. غير أن الكثافة الأيونية لا تتبع تغير أطوار أزمنة الدور RF 13,56Mhz لبطى حركتها، في حين الكثافة الإلكترونية لسرعة حركتها وقدرتها على تتبع التردد المذياعي تتأثر بهذه الأزمنة داخل الغمدين [30]. نلاحظ أيضا أن منحنى الكثافة الأيونية السالبة يمثل تغيير سريع على مستوى الغمدين؛ ربما يمكن معالجة هذا السلوك بزيادة عدد العمليات التكرارية بالنسبة للموضع ولزمن.

الشكل (III-5) يوضح منحنى الكمون الكهربائي، حيث الملاحظة العامة التي يمكن أن نقدمها أن الكمون الكهربائي دائما يأخذ القيمة 0V عند المصعد بسبب الشروط الحدية ثم يتزايد شيئا فشيئا ليأخذ قيمة عظيمة عند المهبط، يأخذ مثلا القيمة 300 V- بالطور $\omega t = 2\pi$.



خلاصة
عامّة والآفاق

خلاصة عامة

تستخدم الطبقات الرقيقة في المجال الصناعي بشكل واسع وخاصة مجال الإلكترونيات الدقيقة نظرا لنجاحاتها في حل العديد من المشكلات والعيوب المتواجدة في المواد وبهذا تحسين خصائصها الفيزيائية والكيميائية. من بين طرق توضع الطبقات الرقيقة هي طريقة التوضع الفيزيائي بالطور البخاري والتي تتدرج تحتها طريقة الرش المهبطي المتناوب RF التي إعتدنا عليها في هذه الدراسة.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة نظرية للخصائص الكهربائية (كثافة الإلكترونية، كثافة الأيونية الموجبة والسالبة، الكمون الكهربائي) لبلازما غاز SF_6 ، المستعملة لتوضع طبقات بطريقة الرش المهبطي مغذى بمصدر جهد متناوب ذو تردد مذياعي RF. توتره $(13.56MHz)$ ، ضغط النظام يساوي $(1Torr)$ ، أما درجة حرارة الإلكترونات فاعتبرناها ثابتة وتساوي $(7.143eV)$ ، استعنا في عملنا هذا بنموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد، يعتمد هذا النموذج على معادلة الإستمرارية ومعادلة بواسون. كما إستخدمنا طريقة الفروق المنتهية و الخوارزمية التكرارية لتوماس للحل العددي و البرمجي.

الفصل الأول كان بمثابة مدخل للموضوع، تطرقنا فيه إلى تعريف البلازما وأهم المقادير الفيزيائية المتعلقة بها، طرق توضع الطبقات الرقيقة وبتحديد جهاز الرش المهبطي المعتمدة في عملنا هذا.

تطرقنا في الفصل الثاني لنموذج الموائع ثم إلى الطريقة العددية والبرمجية لحل معادلاتها لبلازما غاز SF_6 .

قدمنا في الفصل الثالث النتائج المتحصل عليها عن طريق البرنامج العددي فيما يخص حساب (الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية الموجبة والسالبة، والكمون الكهربائي).

وكما قمنا بمقارنة هذه النتائج مع نتائج E. Gogolides et E.-H. Sawin. النتائج المتحصل عليها أبدت توافقا مع نتائج عمل المقارن به من ناحية سلوك منحنيات الكثافات

الأيونية الموجبة والسالبة. منحني كثافة الإلكترونات كان التوافق كبيرا في وسط البلازما فقط وإختلاف على مستوى الغمدين وهذا راجع لأننا إعتبرنا درجة حرارة الإلكترونات قيمة ثابتة ولكن في العمل المقارن به إعتبر درجة حرارة الإلكترونات متغيرة هذا من جانب، ومن جانب أخرى كذلك القيمة الابتدائية $w_t=0$ في عملنا إعتبرناها قيمة ثابتة. كل هاته العوامل ساهمت في إنشاء هذا الإختلاف لهذا نتطلع في المستقبل بإتمام هذا الموضوع بشمولية أكثر وبأخذ بعين الإعتبار كل العوامل التي تساهم بشكل كبير في الحصول على نتائج أكثر دقة. من الآفاق التي نأمل بتطبيقها في هذا الموضوع هي:

- ✓ أخذ عدد أكبر من الأيونات الموجبة والسالبة الناتج عن تأين هذا الغاز SF_6 وكذا الذرات الحيادية له.
- ✓ إعتبار درجة الحرارة الإلكترونية متغيرة.
- ✓ دراسة نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعدين أو ثلاثة.
- ✓ إضافة الحقل المغناطيسي مما يؤثر على الحركية الإلكترونية وإعتبارها مقدار متغير بالنسبة للموضع.



قائمة المراجع

قائمة مراجع

- [1] D. R. Nicholson; "introduction to plasma theory"; University of Iowa ; John Wiley & Sons (1983).
- [2] A. Moustaghfir ; "Élaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate"; Thèse de Doctorat ; Université de Blaise Pascal (2004).
- [3] A. Marie, J. Perrin.et J. Jolly, "Plasmas froids de décharge", Technique de l'ingénieur, D 2830.
- [4] ز. بلة "الدراسة التشخيصية بالمحاكاة العددية لمسبار كهربائية ساكن في الرش المهبطي" مذكرة ماجستير، جامعة قصدي مرياح ورقلة، (2007).
- [5] R. Fitzpatrick. Plasma Physics an Introduction, (CRC Press: New York) 2015
- [6] بهاء حسين صالح ربيع " كتاب أساسيات في فيزياء البلازما " رئيس قسم الفيزياء جامعة بابل.
- [7] J. L. Delcroix, A. Bers, "physique des plasmas", Ed. CNRS ; Paris (1994).
- [8] L. R. Jean, "Introduction `a la Physique des Plasmas" ; cours de Master Physique
- [9] عبيد سعيد "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية لجهاز الرش المهبطي المنغطروني باستعمال طريقة الحجوم المنتهي" مذكرة الماجستير جامعة قصدي مرياح ورقلة، 2012
- [10] A. Marie, J. Perrin.et J. Jolly, "Plasmas froids de décharge", Technique de l'ingénieur, D 2830.
- [11] L. Benmebrouk ; " Etude des Spectres d'émission d'ions de déposition sur couches minces"; Mémoire de Magister, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2003.
- [12] Aguilar R.G. et al., Low cost instrumentation for spin-coating deposition of thin films in an undergraduate laboratory. Latin American Journal of physical Education , Vol. 5, No.2, Mexico , P 368-373, (2011) .
- [13] F. J. Yusta, M. L. Hitchman and S. H. Shamlian, "CVD preparation and modelling of tin dioxide films for electro-chemical applications" , J. Mater. Chem., vol.7, p1421, (1997).
- [14] مدخل عبد العالي "ترسيب الأغشية الرقيقة لأكسيد النحاس المحضرة بطريقة التريز البلازمي المغناطيسي المستمر" مذكرة تخرج ماستر أكاديمي، 2019
- [15] Y.mei Jiang, " Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur ", Doctorat en Science, Université de Paris Xi d'Orsay (1992).

[16] 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).

[17] ز. قويدري؛ "مفعول درجة الحرارة الإلكترونية على الخصائص الكهربائية في بلازما التفريغ الكهربائي"؛ مذكرة ماستر؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2015).

[18] ح. حلوي، رسالة ماجستير، جامعة قسنطينة، (2003).

[19] A. V. Phelps; "The Diffusion of Charged Particles in Collisional Plasmas: Free and Ambipolar Diffusion at Low and Moderate Pressures", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, Vol. **95**, N° 407, pp: 407-431, 1990.

[20] G. J. Nienhuis and W. J. Goedheer; "A self-consistent fluid model for radio-f frequency discharges in SiH₄-H₂ compared to experiments"; Vol. **82** pp 2060-2071(1997).

[21] 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 de Kasdi Merbah Ouargla, 2017

[22] A. Bouchikhi ; " Modèle fluide d'ordre deux en 1D et 2D d'une décharge luminescente " ; Presses Académiques Francophones (2012).

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

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

[25] M. Sibony, et J. Cl. Mardon ; " Analyse numérique II, Approximations et équations différentielles " Hermann ; Editeurs des Sciences et des Arts, Pairs (1984).

[26] G. Vanhulle; "Étude de la cinétique chimique et des propriétés de transport d'un plasma d'arc SF₆-C₂F₄ en déséquilibre thermique. Application à l'étude des disjoncteurs haute tension"; [Ph.D], Université de Toulouse III – Paul Sabatier (2018).

[27] E. Gogolides et E.-H. Sawin, "Continium Modelling of radiofrequency glow discharges, I Theory and results for electropositive and electronegative gases", J. Appl. Phys. 72(9), 3971-3987 (1992).

- [28] Z. Ballah and F. Khelfaoui; "Numerical modelling 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)., Vol.32,N°01pp 620-627.(2019)
- [29] J Hoffman; Numerical Methods for Engineers and Scientists; Marcel Dekker, New York, 2001.
- [30] A. Bouraiou ; Etude et modélisation d'une décharge luminescent ; Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2003).

ملخص:

قمنا في هذا العمل بحساب الخصائص الكهربائية لبلازما غاز SF_6 المستعملة في جهاز الرش المهبطي المتناوب RF13.56 MHz وهذا بتطبيق نموذج الموائع لنظام مرتبط بالزمن ولبعد واحد. يعتمد هذا النموذج على معادلة الإستمرارية مكملة بمعادلة بواسون. وإستخدمنا الصيغة الآسية لعبارة التدفق وطريقة الفروق المنتهية للحل العددي لهذه المعادلات؛ كما إستخدمنا الطريقة التكرارية لتوماس للحل البرمجي. النتائج المتحصل عليها للخصائص الكهربائية للبلازما (الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية الموجبة والسالبة والكمون الكهربائي) أبدت توافقا مع نتائج باحثين آخرين.

الكلمات المفتاحية: بلازما غاز SF_6 ، الرش المهبطي المتناوب RF، الخصائص الكهربائية، الصيغة الآسية وطريقة الفروق المنتهية، الطريقة التكرارية لتوماس.

Résumé

Dans ce travail, nous avons calculé les propriétés électriques du plasma de gaz SF_6 utilisé dans pulvérisation cathodique au régime RF 13,56 MHz, en appliquant le modèle fluide d'un système unidimensionnel dépendant du temps. Ce modèle est basé sur l'équation de continuité; et il est complété par l'équation de Poisson. Nous avons utilisé le schéma exponentiel pour l'expression du flux, la méthode des différences finies et la méthode itérative de Thomas pour la résolution numérique. Les résultats obtenus des propriétés électriques du plasma (la densité électronique, la densité d'ions positifs, la densité des ions négatifs et le potentiel électrique) sont en bon accord avec les résultats d'autres chercheurs.

Mots clés : plasma du gaz SF_6 , pulvérisation cathodique, régime RF, propriétés électriques, schéma exponentielle, méthode des différences finies, méthode itérative de Thomas.

Abstract

In this work, we calculated the electrical properties of the SF_6 gas plasma used in sputtering with RF 13.56 MHz regime. We applied the fluid model of a one-dimensional time-dependent system. This model is based on the continuity equation and Poisson equation. We used the exponential scheme for the flux expression, the finite difference method and Thomas iterative method to solve numerical solution. The obtained results of the electrical properties of plasma (the electronic density, the positive ionic density, the negative ionic density and the electric potential) are in good agreement with the results of other researchers.

Keywords: SF_6 gas plasma, sputtering, RF regime, electrical properties, exponential scheme and finite difference method, Thomas iterative method.