

توصيف بلازما مضاعفة متعددة القطبية المغناطيسية والكشف عن عدم استقرارية صوتية أيونية منخفضة التردد

الدكتور عبد الوهاب قعقع*

(تاريخ الإيداع 14 / 10 / 2010. قبل للنشر في 11 / 8 / 2011)

□ ملخص □

إن اضطراباً إلكتروستاتيكيًا عند تردد منخفض مولدًا بالمنظومة "حزمة أيونات- بلازما" كان قد تمت دراسته تجريبياً في آلة البلازما المضاعفة بوجود شبكة مقطبة سلبياً تفصل بين غرفتي إنتاج البلازما المنبع والبلازما الهدف. لقد تم حدوث إثارة ذاتية لعدم استقرارية صوتية أيونية عند تردد منخفض في البلازما الهدف بجوار الشبكة وذلك عندما تكون الطاقتان الكامنتان للبلازمتين الواقعتان على كل من طرفي الشبكة متساويتين تقريباً وأيضاً عندما يكون توليد البلازما الترمو- أيوني محصوراً على غرفة المنبع. لقد تمت ملاحظة عدم الاستقرارية هذا وتسجيله من خلال حقن حزمة أيونات من البلازما المنبع باتجاه البلازما الهدف تم اختيار سرعتها بين السرعة الصوتية الأيونية C_s وضعفي هذه القيمة $2C_s$. إن تردد تلك اللااستقرارية f محصور بين 100kHz و 200kHz ، والذي يشكل تقريباً عشر تردد البلازما الأيوني $\omega_{p,i}$ ($f = 0.1 \omega_{p,i}$).

يُعزى نشوء تلك اللااستقرارية إلى وجود غمد من الأيونات الصرفة حول الشبكة، فقد تم الكشف عنها كمركبة عشوائية لتيار الشبكة وأيضاً كانتشار لتموج الكثافة في البلازما الهدف بدرجة تعديل تبلغ بضعة أجزاء بالمائة. لقد لوحظ أن سعة التموج لتلك الكثافة تبلغ حداً أعظماً على بعد بضعة سنتيمترات من الشبكة الفاصلة بين الغرفتين.

الكلمات المفتاحية: بلازما مضاعفة، انفاغ كهربائي، غمد الشبكة، مساب، لانغمو، منظومة "حزمة أيونات- بلازما"،

Caractérisation d'un Double-Plasma Multipolaire magnétique et Détection d'une Instabilité Acoustique Ionique à Basse Fréquence

Dr. Abdulwahab Queka*

(Récrive 14 / 10 / 2010. Accepté 11 / 8 / 2011)

□ ABSTRACT □

Une turbulence électrostatique à basse fréquence générée par le système "faisceau d'ions-plasma" a été étudiée expérimentalement dans une machine "double-plasma" avec une grille négativement polarisée qui sépare les deux chambres de production des plasmas: source et cible.

L'auto-excitation d'une instabilité acoustique ionique à basse fréquence a lieu dans le plasma cible autour de la grille lorsque les potentiels des plasmas sur chaque côté de la grille sont presque égaux et lorsque la production du plasma thermo-ionique est restreinte à la chambre source. Cette instabilité est observée et enregistrée pendant l'injection d'un faisceau d'ions du plasma source vers le plasma cible ayant une vitesse choisie entre la vitesse acoustique ionique C_s et le double de cette valeur $2C_s$. La fréquence de cette instabilité est comprise entre 100kHz et 200kHz, ce qui constitue à peu près un dixième de la fréquence du plasma ionique $\omega_{p,i}$.

Liée à l'existence d'une gaine d'ions pure autour de la grille, cette instabilité est détectée comme un composant aléatoire du courant de la grille et comme une propagation de fluctuation de la densité dans le plasma cible avec un degré de modulation de quelques pourcents. L'amplitude de fluctuation de la densité est maximale à quelques centimètres de la grille.

Mots-clés: Double-Plasma, Décharge électrique, Gaine de grille, Sondes de Langmuir, Système faisceau d'ions-plasma, Instabilité Acoustique Ionique à Basse, Interaction onde-particule, Vitesse acoustique, Anode virtuelle.

مقدمة:

* Maître de Conférences, Département de Sciences Basics, Faculté de Génie Electrique et Electronique, Université d'Alep, Syrie.

في آلة البلازما المضاعفة ذات الشبكة المحيطة سلبياً والتي تتوسط غرفتي توليد البلازمتين المنبع والهدف، تم ملاحظة لاستقرارية صوتية- أيونية (instabilité acoustique ionique) منخفضة التردد محرّضة ذاتياً وذلك عندما تكون الطاقتان الكامنتان للبلازمتين الواقعتان على طرفي الشبكة متساويتين تقريباً (بينهما فرق صغير جداً). إن تردد اللاستقرارية المذكورة محصور بين 100kHz و 200kHz، وهو يشكّل تقريباً عشر تردد البلازما الأيوني $\omega_{p,i}$ (أي: $0.1 \omega_{p,i}$). إن نشوء هذه اللاستقرارية معزوّ إلى وجود غمد من الأيونات الصرفة حول الشبكة، لذلك فقد تمّ الكشف عنها كمركبة عشوائية لتيار الشبكة وكان انتشار لتموج الكثافة الإلكترونية في البلازما الهدف بدرجة تعديل (degré de modulation) تبلغ بضعة أجزاء بالمائة [7]. إن سعة تموج الكثافة تكون عظمى على بعد بضعة سنتيمترات من الشبكة.

من المعروف أنه بزيادة عدم التناظرية (خرق التناظر) في التشكيلات، سواء فيما يتعلّق بكثافة البلازما أم بطاقتها الكامنة، فإنّ لاستقراريات للشحنة الفراغية (charge d'espace) تظهر بترددات تقع تقريباً ضمن المجال من 0.5 وحتى 0.9 من تردد البلازما الأيوني $\omega_{p,i}$ [1]. عندما يكون توليد البلازما الترمو- أيوني (thermo-ionique) محصوراً على غرفة المنبع، فإنّ حقن تيار من الأيونات بحيث يتجاوز حدّ الشحنة الفراغية يؤدي إلى اهتزاز مصعد وهمي (oscillation d'un anode virtuelle) على الطرف الهدف مع تضخيم بتغذية عكسية من الأيونات التي تمّ اصطياها في غمد الشبكة [11]. إن تردد الاهتزاز الإجمالي لهذا المصعد الوهمي يكون محدداً بتردد أيونات البلازما المحقونة $\omega_{p,i,inj}$ [2].

لقد تمّت ملاحظة ظاهرة مشابهة عندما طبّق فرق في الطاقة الكامنة بين بلازمتين ذاتي كثافتين متقاربتين على كلا طرفي الشبكة [2]. في هذه الحالة تمّت ملاحظة مركبة منتشرة باتجاه البلازما الهدف ناتجة عن حمل (convection) اضطرابات الكثافة بواسطة حزمة الأيونات. إن التردد f متناسب مع تردد البلازما الأيوني للبلازما الهدف $\omega_{p,i,cible}$. تشير إلى أنّ استخدام سلم جهود لتقطيب الشبكة وفقاً للتناسب $f \propto U_G^{-\alpha}$ ($\alpha = 0.25, \dots, 0.5$) هو نفسه في كلتا الحالتين [12].

خلافاً للظواهر المشار إليها أعلاه، فإنّ اللاستقرارية ذات الصلة التي تمّ ملاحظتها لا تظهر إلا في شروط تناظرية كفاية. وسيتمّ تفصيل ميزاتنا لاحقاً بعد عرض الخطوات التجريبية.

أهمية البحث وأهدافه:

يركز هذا البحث على الاضطراب الصوتي الأيوني في البلازما ودراسة اللاستقراريات الصوتية الأيونية التي تنشأ فيها بشكل عام، وذلك باختيار منظومة تجريبية مغايرة لكثير من المنظومات التي تمّت فيها دراسة الأمواج وانتشارها. هذه المنظومة هي منظومة البلازما المضاعفة التي تمكنا من إحداث هذا الاضطراب من خلال سياق خلق النظام "حزمة أيونات- بلازما". وتأتي أهمية هذا العمل بشكل خاص من خلال الكشف عن لاستقراريات صوتية أيونية منخفضة التردد التي تنتج في البلازما وإيجاد الشروط والظروف المناسبة لظهورها وتحديدها.

طرائق البحث ومواده:

سوف نقوم في البداية بإعطاء فكرة عن البلازما المضاعفة وكيفية إنتاج البلازما فيها ومن ثم توصيفها وأيضاً كيفية قياس متحولاتها الأساسية بمساعدة مسابر لانغيمير التي تم وصفها أيضاً. سنتطرق أيضاً إلى كيفية خلق النظام "حزمة أيونات - بلازما" في هذه الآلة وتحليل طاقتها بمساعدة محلل طاقة إلكتروستاتيكي. سنعرض أيضاً الأدوات ونظام اقتناء المعطيات وتسجيل البيانات المتمثلة برواسم الإشارة ومحللات الطيف ووسائل المراقبة والتحكم. في النهاية سنقدم النتائج العملية المتعلقة بكيفية حقن حزمة أيونات من البلازما المنبع إلى البلازما الهدف عبر غمد الشبكة ودراسة سلوك الجسيمات المشحونة في جوار الشبكة الذي يعطي تفسيراً منطقياً للنتائج التي حصلنا عليها المتعلقة بنشوء عدم الاستقرارية الصوتية الأيونية منخفضة التردد التي هي محور البحث.

منظومة الأجهزة التجريبية و نظام الحصول على المعطيات:

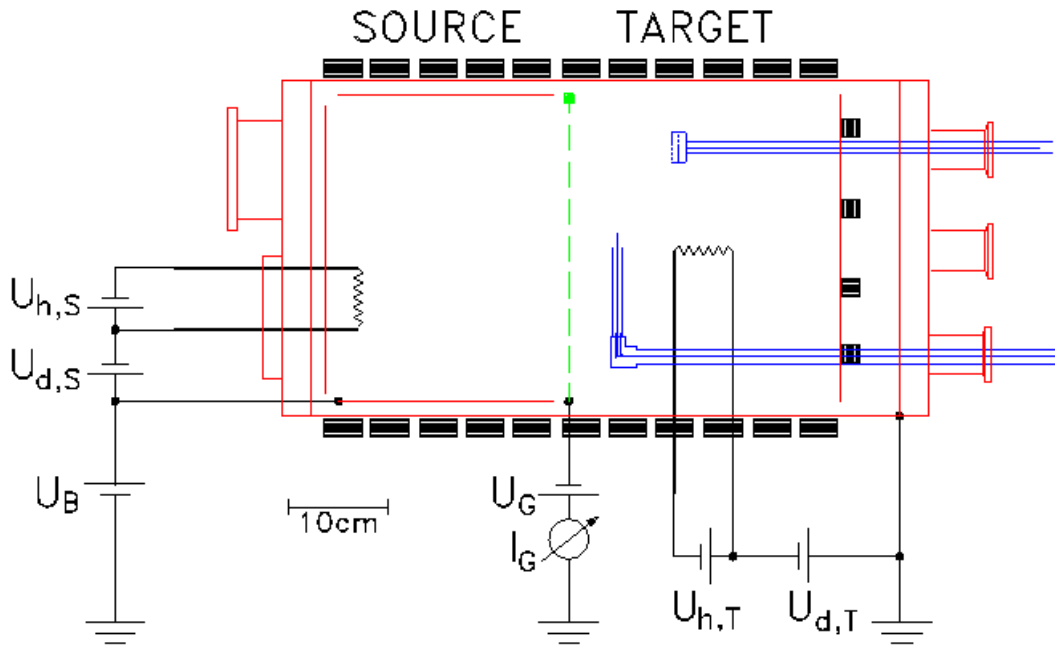
إن المنظومة المستخدمة هنا هي بلازما مضاعفة متعددة القطبية كلاسيكية، شبيهة بتلك التي كانت قد استخدمت في السبعينات. هذا الطراز من المنظومات يبقى الأداة الأساسية للبحوث الأساسية في فيزياء الأمواج داخل البلازما (تفاعل موجة-جزيئة). كما أن هناك نماذج مختلفة لهذه المنظومات تتضمن وجود حقل مغناطيسي كانت قد انتشرت وتطورت مع مرور الزمن، وقد استخدم هذا الطراز من المنظومات بشكل خاص في التجارب المتعلقة بالمنظومة "حزمة أيونات - بلازما" وذلك في منتصف السبعينات.

1- البلازما المضاعفة متعددة القطبية وخواصها:

إن ظهور مولدات ومفاعلات البلازما ذات النموذج متعدد القطبية سمح بتطورات جديدة في التجارب حول الأمواج ضمن البلازما المخبرية [17]. تولد البلازما ضمن هذه الآلات (مولدات البلازما) بواسطة انقراض كهربائي تحت ضغط منخفض وذلك ضمن وعاء ذي حجم كبير مفرغ من الهواء حيث يتم إصدار الإلكترونات الابتدائية الطاقية بواسطة سلسلة من الفتائل المسخنة. تشير إلى أن هناك حقلاً مغناطيسياً متعدد القطبية على جدار الوعاء يقوم بعملية عكس الإلكترونات المؤيئة وحصرها ويضمن في الوقت نفسه تزياداً قوياً للكثافة الإلكترونية كما يضمن أيضاً الانتظام والتماثل الأفضل للبلازما. علاوة على ذلك فهو يضمن أيضاً أن يكون مستوى الضجيج ضعيفاً، حيث يعزى هذا الضجيج إلى سياق تكوين البلازما وخلقها ضمن تشكيلنا الموصوف حيث إن هذا السياق هو نقطة هامة جداً في تجارب عدة [18, 20, 21]. إن المنظومة المستخدمة هي نظام بلازما مضاعفة تم إجراء تعديلات عليها تتماشى مع متطلبات تجاربنا. يمكن عرض مخطط مبسط لهذه المنظومة في الشكل (1).

تتكون هذه المنظومة من أسطوانة من الـ "الستانلس ستيل" قطرها 35cm وطولها 70cm تُفرغ أولاً من الهواء إلى الضغط 10^{-6} mBar، حيث يُدخل غاز الأرجون الخامل ويُثبت الضغط عند 10^{-4} mBar (ضغط العمل). تُقسم الأسطوانة بواسطة شبكة معدنية ناعمة ذات معدل شفافية عالٍ (80%) إلى غرفتين منفصلتين الأولى توافق الطرف المنبع (الغرفة التي تولد فيها البلازما المنبع) والأخرى توافق الطرف الهدف (الغرفة التي تولد فيها البلازما الهدف). في غرفة المنبع وإلى داخل الوعاء يوجد أسطوانة إضافية معزولة كهربائياً عن الوعاء بطريقة يمكننا بها تمييز البلازما المنبع بواسطة جهد معين U_B (U_{Bias})، حيث نستطيع من خلال هذا الجهد تحديد سرعة حزمة الأيونات المحقونة من غرفة المنبع إلى غرفة الهدف. يوجد فتيلة تسخين واحدة من التنغستن متوضعة في غرفة الهدف، واثنان أخريتان في غرفة المنبع، وتكون هذه الفتائل المهابط والتي لها مواصفات متكافئة (قطر كل منها وطوله على الترتيب: 0.2 mm، 9 cm)، في حين أن جدار الآلة الكلي للطرف الهدف والأسطوانة الداخلية للطرف المنبع يكونان المصاعد. يمكن تكوين البلازما في كل غرفة بتطبيق جهد تسخين U_h (U_{heat}) على كل فتيلة من فتائل التنغستن، هذا الجهد يعادل

تقريباً 4 volts لكل فتيلة والذي يقابل تياراً كهربائياً شدته 4 ampères لكل فتيلة. يحدث هذا التسخين الفتائل على إصدار الإلكترونات بواسطة الفعل الكهرحراري (Effet thermoélectrique)، وتسمى هذه الإلكترونات المبعثة "الإلكترونات الابتدائية أو الإلكترونات الطاقية" التي يمكن تسريعها بتطبيق جهد انفراف $U_{d-s,T}$ (مقابل لفرق الطاقة المطبق بين الفتائل (المهابط) والمساعد. هذه الإلكترونات الطاقية (نموذجياً طاقتها 40eV) تدخل في تصادمات متعاقبة مع الذرات المعتدلة لغاز الأرجون فتؤينها لتخلق بدورها إلكترونات تسمى "الإلكترونات الثانوية" التي تشكل الإسكان الإلكتروني للبلازما. يعرض الجدولان (1) و (2) متغيرات الانفراف الكهربائي ومواصفات البلازما [13, 14, 16].



الشكل(1): مخطط لآلة البلازما المضاعفة المولدة بالانفراف الكهربائي.

الجدول(1): المتحولات النموذجية للانفراف الكهربائي

$p_0=10^{-6}$ mBar	الضغط البدائي (الفراغ)
$p=10^{-4}$ mBar	ضغط العمل (أرغون)
$I_h=4$ A/filament	تيار التسخين
$U_d=40$ V	جهد الانفراف
$I_d=10 \dots 500$ mA	تيار الانفراف
$U_G=0 \dots 150$ V (سلبياً)	تقطيب الشبكة

الجدول(2):متحولات البلازما

$n=10^8 \dots\dots 10^9 \text{ cm}^{-3}$	الكثافة الإلكترونية
$T_e=2 \dots\dots\dots 4 \text{ eV}$	درجة الحرارة الإلكترونية
$T_i=0.06 \dots\dots\dots 0.1 \text{ eV}$	درجة الحرارة الأيونية
$\lambda_{De}=0.013 \dots\dots\dots 0.13 \text{ cm}$	طول ديبي Debye

من أجل توسيع حقل التجارب الممكن ومن أجل الحصول على إنتاج فعال للبلازما، تمّ تجهيز الوعاء الأسطواني بمغانط دائمة من الحديد المطاوع مثبتة على سطحه الخارجي وفقاً لمولدات الأسطوانة بحيث تكون خطوط هذه المغانط مفصولة عن بعضها البعض بمسافة 8cm تقريباً، وأيضاً بمغانط دائمة أخرى مثبتة على سطح القاعدة للطرف الهدف بشكل قطري. بتوزع المغانط بهذا الشكل يكون الحقل المغناطيسي B في مركز الوعاء معدوماً. يجب لفت الانتباه إلى أن هذه المغانط موزعة وموجهة بطريقة تضمن حصر الإلكترونات الابتدائية (أي بالترتيب: N-S-N ... S)، كما تضمن زيادة احتمال التصادمات المؤيثة قبل ضياع هذه الإلكترونات في خطوط التهريب للبنية متعددة القطبية المكوّنة بالشكل المذكور [2, 3].

2- المسابر المستخدمة:

لمعرفة البلازما بشكل جيد نحتاج لأدوات تشخيص. من بين أدوات التشخيص هذه المستخدمة في فيزياء البلازما الأكثر بساطة للاستخدام والأكثر قدماً هي مسابر لانغمير (sonds de Langmuir) [4, 22]. إضافة إلى المسابر فقد استخدمنا أيضاً محلّ طاقة إلكتروستاتيكي (analyseur électrostatique) مؤلف من شبكتين وذلك لتحليل طاقة الأيونات.

- **مسابر لانغمير Sonds de Langmuir** : تتألف مسابر لانغمير من سطوح معدنية مجمعة (لاقطة) توضع ضمن البلازما، حيث نتمكن بدراسة المميزات "تيار- جهد" لهذه المسابر من التعرف على مكونات البلازما [22]، وقد استخدمنا ثلاثة أنواع من المسابر ذات أبعاد وأشكال مختلفة. المسابر المسطحة التي تتألف من قرص معدني من مادة التنتال (Tantal) قطره 5mm معزول من أحد وجهيه وملحوم على نهاية طرف كبل محوري متوسط الصلابة محاط بغمد من الألمنيوم (أنظر الشكل-2)، المسابر الأسطوانية التي قطرها 1mm وطولها 4mm، وأيضاً المسابر الكروية التي قطرها 3mm.

من أجل تقطيب المسابر، تمّ استخدام مولد جهد متغير يزود إشارات من نوع سن المنشار، حيث يمر التيار الكهربائي في مقاومة حمل قيمتها النموذجية $1k\Omega$ ، ويمثل هبوط الجهد على طرفيها قيمة التيار الملتقط (طبعاً هو تيار الإلكترونات الذي يلتقطه المسبر المقطّب إيجابياً). هذه الجهود معلنة على راسم اهتزاز مهبطي أو على طاولة راسمة كهربائية، ويمكن أيضاً تطبيقها على بطاقة إلكترونية لاقتناء المعطيات (تسجيل البيانات) من خلال الحاسب الإلكتروني (PC).

تمكننا مسابر لانغمير من دراسة البلازما وذلك من خلال دراسة مميزات (I-V) [22]، وتعتبر الطاقة الكامنة للبلازما، الكثافة الإلكترونية، ودرجة الحرارة الإلكترونية من المتحولات الأكثر أهمية. من أجل ذلك نقطب المسبر إيجابياً وندرس الميزات "تيار- جهد" لهذا المسبر. في الواقع إن جزئية كتلتها m وشحنتها q موجبة تصل إلى المسبر المقطّب بالطاقة الكامنة (أي الجهد) V سوف تنفر منه إذا كانت سرعتها في الاتجاه العمودي على سطح

المسبر أصغر من القيمة $v_{\min} = \left(\frac{2qV}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$. وعندما تكون الطاقة الكامنة (الجهد) المطبقة على المسبر أكبر من الطاقة الكامنة للبلازما ϕ_p فإن الإلكترونات هي الوحيدة فقط التي سيتم التقاطها من قبل المسبر، ويصل تيار الإلكترونات إلى سوية إشباع I_e^{sat} وتتفر الأيونات في هذه الحالة من المسبر (المنطقة-4 من الشكل-3). نفس الظاهرة تحدث من أجل الأيونات (جذب الأيونات إلى حدّ الإشباع ونفر الإلكترونات، المشار إليه في المنطقة-1 من الشكل-3). إن هيئة هذه الخصائص ممثلة على الشكل (3) الذي نميز عليه أربع مناطق:

(1) مجال تيار الإشباع الأيوني I_i^{sat} ، (2) مجال التيار المهيمن عليه بواسطة مشاركة الإلكترونات الابتدائية (الإلكترونات الطاقية)، (3) مجال التيار المهيمن عليه بواسطة مشاركة الإلكترونات الثانوية (الإلكترونات الحرارية)، (4) مجال تيار الإشباع الإلكتروني الحدي I_e^{sat} . وسوف نفرض دائماً أنّ $I_e^{sat} > 0$ وأنّ $I_i^{sat} < 0$.

إن الطاقة الكامنة للبلازما هي الحدود الفاصلة بين المنطقتين (3) و (4). ويتمّ تحديدها من خلال رسم الخط المقارب لمنحني تيار الإشباع الإلكتروني الممثل بالمنطقة (4) ورسم المماس (tangente) في نقطة الانعطاف لمنحني تيار الإلكترونات الحرارية (الثانوية) الواقع في الحدود الفاصلة بين المنطقتين (3) و (4). إن تقاطع هذين المستقيمين يعطينا الطاقة الكامنة للبلازما ϕ_p . (يمكن ملاحظة ذلك على الشكل-3).

إن النقطة التي يتوازن فيها التياران الإلكتروني والأيوني بحيث تكون قيمة التيار المحصل معدومة تعطينا قيمة الطاقة الكامنة العائمة ϕ_f (potentiel flottant) (عدد الأيونات الواصلة إلى المسبر يساوي إلى عدد الإلكترونات الواصلة إليه). بشكل عام، سوف نجد دائماً أنّ الطاقة الكامنة للبلازما ϕ_p هي أكبر من الطاقة الكامنة العائمة ϕ_f .

إن كلّ مجال من المجالات الأربعة السابقة (المناطق الممثلة على منحنى المميزات في الشكل-3) موصوف نموذجياً بواسطة تابع نظري نوعي؛ بشكل خاص من أجل المجال (2) لدينا سلوك خطّي للتيار يُعزى إلى الإلكترونات الطاقية (الإلكترونات الابتدائية)، بينما من أجل المجال (3) لدينا تغيرات أسية للتيار مُعزاة إلى الإلكترونات الحرارية (الإلكترونات الثانوية) يمكن وصفها (من أجل $V \leq 0$ عند طاقة البلازما) كما يلي:

$$I_e = I_e^{sat} \exp\left(\frac{+V}{T_e}\right) \quad (\text{pour } V < 0 \text{ et } V = 0 \text{ au potentiel plasma}) \Rightarrow I_e = I_e^{sat} \exp\left(-\frac{e \Delta\phi}{kT_e}\right)$$

حيث $\Delta\phi$ هو فرق الطاقة الكامنة الموجب المطبق على المسبر بالنسبة للطاقة الكامنة للبلازما ϕ_p ، I_e^{sat} هو تيار الإشباع الإلكتروني، T_e هي درجة الحرارة الإلكترونية و k هو ثابت بولتزمان.

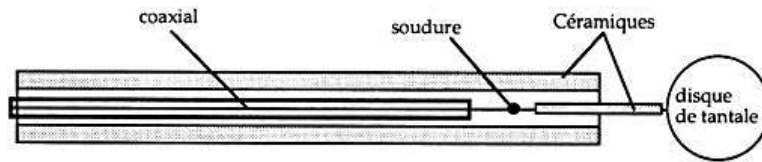
إنّ تيار الإشباع الإلكتروني I_e^{sat} يعطينا الكثافة الإلكترونية n_e للبلازما [4]، أمّا I_e^{sat} فله الشكل:

$$I_e^{sat} = 0.4 e^- \cdot n_e \cdot A \left(\frac{kT_e}{m_e} \right)$$

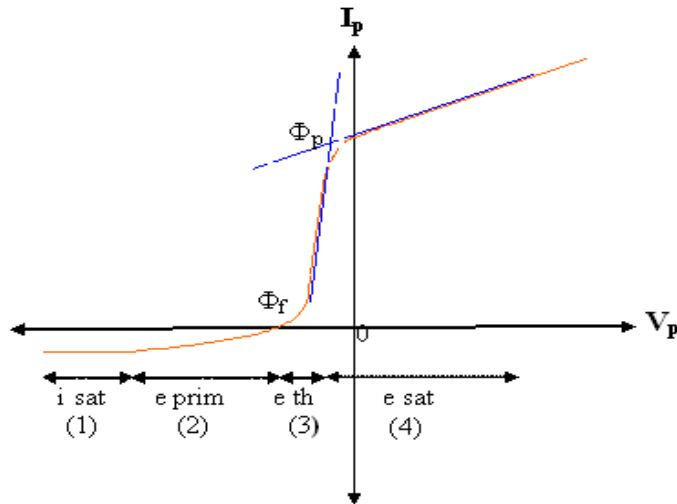
حيث A هو سطح المسبر المجمع (اللاقط)، e^- شحنة الإلكترون و m_e كتلته.

يمكننا أيضاً أن نحصل على درجة الحرارة الإلكترونية باشتقاق لوغاريتم التيار المجمع (التيار الملتقط) بالنسبة للجهد المطبق على المسبر (المنطقة-3). أخيراً، فإن مشتق المميزات (مشتق التيار) بالنسبة للطاقة الكامنة يعطينا تابع توزع الإلكترونات.

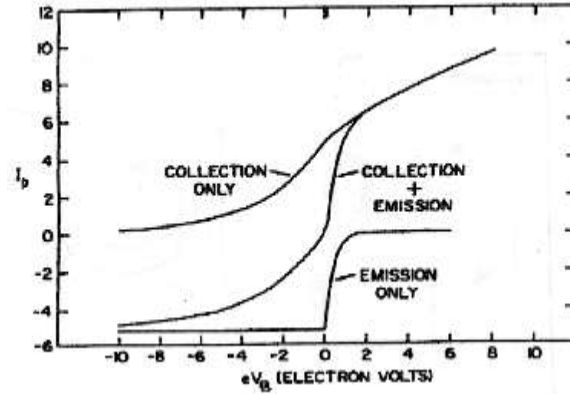
- **المسابر الإصدارية Les sondes émissives**: يمتاز هذا النوع من المسابر بخاصية إصدار الإلكترونات التي تعمل على تغيير الشحنة الفراغية (charge d'espace) بجوار نقطة الالتقاط (نقطة التجميع). ويتألف هذا المسبر من فتيلة صغيرة جداً تبلغ حدّ التوهج مصدره الإلكترونات والتي عليها نقيس الميزات "تيار- جهد". إنَّ هذا المسبر شبيه بمسبر مسطح أو أسطواني ولكن في هذه الحالة يضاف إلى التيار الإلكتروني الملتقط تيار إلكتروني آخر هو التيار المبعوث من قبل هذا المسبر بفضل الفتيلة المتوهجة (أنظر الشكل-4). يسمح الشكل (4) بتقدير الطاقة الكامنة للبلازما ϕ_p وكأنها تقريباً مساوية للطاقة الكامنة العائمة ϕ_f ضمن الشروط الإصدارية لهذا المسبر وذلك بإحكام منحني التيار بحيث يكون تيار الإلكترونات المنبعثة $I_{\text{émission}}$ مساوياً بالقيمة المطلقة لتيار الإلكترونات المتجمعة $I_{\text{collection}}$.



الشكل(2): مسبر لانغمير



الشكل(3): خصائص "تيار- جهد" لمسبر لانغمير



الشكل(4): خصائص تيار- جهد" لمسبر إصداري، مع تحليل لمركبته: الميزة الإصدارية والميزة الالتقاطية.

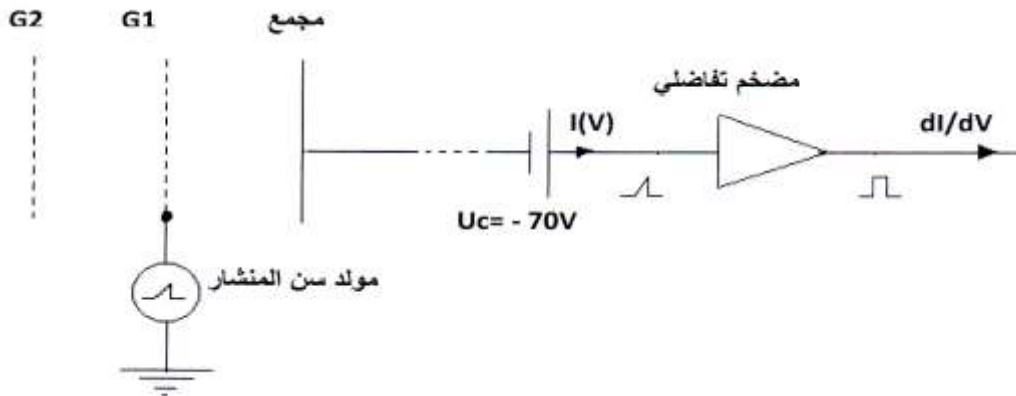
3- المحلل الإلكتروستاتيكي Analyseur électrostatique

يمكن عملياً الحصول على تابع توزع الأيونات للبلازما الهدف بمساعدة محلل كهربائي إلكتروستاتيكي مؤلف من شبكتين اثنتين ومجمع وذلك بوضعه في محور حزمة الأيونات (أنظر الشكل-5). إن كل شبكة من الشبكتين المذكورتين لها شفافية بنسبة % 30 من أجل قطر 1cm:

* الشبكة الأولى G_1 : تُترك عائمة أو تُحمل إلى طاقة البلازما وذلك من أجل تأخير الإلكترونات وبالتالي تقليل الاضطرابات الآتية من المحلل إلى البلازما بسبب غمره ضمنها (جسم غريب في البلازما). لقد تبين لنا أنه يمكننا زيادة قوة التحليل للمحلل وذلك بتقطيب هذه الشبكة إلى طاقة كامنة سالبة قليلاً؛ أي بجذب الأيونات قليلاً باتجاه المحلل. في الحقيقة ليس عندنا شرح لهذه الظاهرة.

* الشبكة الثانية G_2 : يتم إخضاعها لطاقة كامنة (جهد V) على شكل سن المنشار، وبذلك تلعب هذه الشبكة دور الناخب لطاقة الأيونات وذلك بتزويدها حاجزاً كمونياً متغيراً V .

* المجمع C : ويكون مقطباً سلبياً إلى جهد قدره 70 V، حيث يقوم بردّ الإلكترونات عالية الطاقة التي تمكنت من عبور الشبكة G_1 ، كما يقوم أيضاً بتجميع الأيونات. نشير هنا إلى أننا نهمل الإصدار الثانوي للإلكترونات الصادرة عن المجمع.



الشكل(5): المحلل الإلكتروستاتيكي لطاقة الأيونات: مخطط الدارات للتقطيب والتكبير.

رياضياً يمكننا الحصول على تابع توزع الأيونات بمفاضلة التيار الملتقط على المجمع بالنسبة لطاقة الأيونات. أما تيار المجمع فيساوي [2]:

$$I(v) \propto \int_{v(\phi)}^{\infty} v f(v) dv = \int_{\phi}^{\infty} \left(\frac{2e\phi}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot F(\phi) \cdot \left(\frac{2e}{m_i \phi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \cdot d\phi \propto \int_{\phi}^{\infty} F(\phi) \cdot d\phi$$

حيث $F(\phi)$ ، $f(v)$ يمثلان على التوالي تابعي توزيع السرعة والطاقة الكامنة للأيونات، ويكون لدينا دائماً

$$F(\infty) = 0 \text{ . وينتج عن ذلك أن: } \frac{dI}{d\phi} \approx F(\phi)$$

إن المشتق الأول لمميزات التيار بالنسبة للطاقة الكامنة $(dI(v)/d\phi)$ يعطينا تماماً تابع توزيع السرعة لأيونات الحزمة على بعد واحد. إن تابع التوزيع هذا يعطي قياساً صحيحاً لسرعة الحزمة طالما أنها أكبر من السرعة الحرارية للأيونات (السرعة الصوتية الأيونية). في هذه الحالة سيكون لدينا قمتان اثنتان على تابع التوزيع منفصلتين تماماً عن بعضهما البعض موافقتين على الترتيب إلى أيونات البلازما وأيونات الحزمة. إن الفرق الطاقى بين هاتين القمتين (الفرق بين الطاقتين الكامنتين) يعطينا مباشرة طاقة حزمة الأيونات.

4- الأدوات ونظام الحصول على المعطيات:

4-1- الأدوات: تُبدي البلازما الموصوفة في تشكيلنا السابق ضمن شروط معينة ميزة اضطرابية، فهي إذاً بلازما مضطربة. وتحليل هذا الاضطراب (اضطراب صوتي أيوني - turbulence acoustique ionique) المنتشر بترددات قريبة من تردد البلازما الأيوني يتطلب تسجيلاً للإشارات الكهربائية ضمن سلم للترددات من الصفر (تيار مستمر) وحتى 1MHz بشكل مُعلن على شاشة إظهار. من أجل ذلك استخدمنا رسمي إشارة رقميين من طراز C Locroy 9403 كل منهما له أربع قنوات حيث إن كل قناة بوسعها أن تسجل في الذاكرة 50000 نقطة (عينة). نشير إلى أن تردد العينات (تردد المسح) محقق على 200 MHz بقوة فصل 8 بايت (8 Bits). كما استخدمنا أيضاً راسم إشارة رقمي ثالث لإظهار السوليتونات Les solitons ومراقبة انتشارها. أخيراً كنا قد استخدمنا راسم اهتزاز تشابهي (analogique) رابع يفيد في الإظهار الدائم لخصائص المسبر "تيار- جهد" لبلازما المنبع.

أما التحليل الطيفي للأمواج فقد تمّ بواسطة محلّ طيف تشابهي (analyseur de spectre analogique)، كما أن تضخيم الإشارات وترشيحها (مرشح: عصابة- سفلي) قد تمّ من خلال جهاز من طراز Tektronix AM 502 حيث إن التضخيم والترشيح يتمان بواسطة عدّة معدّلات من خلال عدة سحابات (صناديق) مُدرّجة داخل الصندوق (الشاسيه) لهذا الجهاز والتي هي بدورها أيضاً مولدات إشارة.

4-2- المراقبة والتحكم- نقل وتحويل المعطيات:

إنّ التجهيزات والمعدّات مراقبة ومحكومة بواسطة حاسب آلي عالي الوثوقية (ميكرو كومبيوتر) وذلك بتوسط البرنامج المنطقي LaboWindows of National Instruments. إن برامج هذا النظام مكتوبة باللّغة المنطقية C التي تسمح لنا بتسهيلات كبيرة في تغيير طرائق الاقتناء وتطويرها وكذلك في المراقبة والتحكم. وبشكل خاص فإنّ هذا النظام يسمح لنا بإظهار الصور والرسومات "الزمانية- المكانية" (spatio-temporels) الموافقة لأنظمة مضطربة بزمان حقيقي (أي بمقياس زمن حقيقي).

النتائج والمناقشة:

1- إنتاج حزمة الأيونات ودراسة سلوك الجسيمات المشحونة في جوار الشبكة:

إن البلازما المكوّنة في كل غرفة (البلازما المنبع والبلازما الهدف) لها كما رأينا كثافة إلكترونية نموذجية n من مرتبة 10^9 cm^{-3} ودرجة حرارة إلكترونية T_e من 2 إلى 3eV، أي أنّ النسبة T_e/T_i مقدرة بين 30 و40 [1,3]. كما أنّ البلازما المنتجة في هذا الانفراج [3, 4] هي بالتأكيد مؤينة بشكل ضعيف (بلازما ضعيفة التأين) ذلك لأن عدد الإلكترونات الابتدائية الصادرة عن الفتائل (المهابط) ليس كافياً لكي تتجح هذه الإلكترونات في تأيين كلّ ذرات غاز الأرجون، حيث إنّ معدّل التأين هنا قريب من 0,1% .

إن معظم الدراسات حول اضطراب البلازما كانت قد أُجريت ضمن بلازما غير خاضعة لتطبيق حقل مغناطيسي. أما في حالة البلازما الخاضعة لحقل مغناطيسي (هذه الحالة ليست حالتنا هنا)، فإنه وفقاً لشدة هذا الحقل سوف تظهر آثار وأفعال إضافية سببها الحركة السيكلوترونية للأيونات (mouvement cyclotronique d'ions) يجب إدخالها في الحساب، مع ظهور أشكال (des modes) لسيكلوترونات أيونية (des cyclotrons ioniques) يمكنها أن تكون غير مستمرة (déstabilisés).

لقد قادت التجارب بطريقة كلاسيكية إلى المنظومة "حزمة أيونات- بلازما- (système faisceau d'ions-plasma) غير الممغنطة (وهي حالتنا وفق التشكيل السابق)، حيث إن النظام المستمر يمكن الحصول عليه ضمن التشكيل "بلازما- مضاعفة" بتطبيق فرق في الطاقة الكامنة ($\Delta\phi$) بين مصعدي البلازما "المنبع" والبلازما "الهدف".

بذلك فإن حزمة من الأيونات ذات السرعة $v_{\text{beam}} = \left(\frac{2e \cdot \Delta\phi}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}}$ سوف يتمّ حقنها في البلازما الهدف [15].

إن إثارة الاستجابات الخطية أو غير الخطية في البلازما الهدف المشاركة للانتشار (propagation) وفقاً للصيغة الصوتية الأيونية (mode acoustique ionique) يمكن تحقيقها بإحداث اضطراب عابر (perturbation transitoire) لطاقة المصعد "المنبع" وذلك من خلال تطبيق نبضات جهد (مولّد جهد متناوب أرض أحد أقطابه) على الأسطوانة الداخلية الإضافية الموضوعة في غرفة المنبع والمعزولة كهربائياً عن وعاء البلازما وذلك بمعدّل تكرار قدره بضعة كيلوهرتزات. هذه الاستجابات يمكن أن تكون أمواجاً مستمرة أو أمواجاً وحيدة أو أمواجاً صدمية.

من أجل فهم الظواهر المسجّلة بشكل أفضل، فإنه يتوجب علينا فهم سلوك الجسيمات المشحونة في جوار الشبكة المعدنية المقطّبة سلبياً [5, 6]. سنهتم هنا بما يحدث حول الشبكة المعدنية (بجعل $U_B = 0$ ، أي دون تقطيب مصعد المنبع) وذلك بالنظر إلى الكيفية التي تتطور بها الطاقة الكامنة للبلازما في تلك المنطقة المسماة "قرب الغمد" (prégaine).

ليكن لدينا تشكيل متناظر بالنسبة للشبكة المعدنية التي تفصل غرفة المنبع عن غرفة الهدف، ولنعتبر الحالة البسيطة أحادية البعد. إنّ التمثيل البياني للطاقة الكامنة بمحاذاة المحور له الهيئة المبينة في الشكل (6)، حيث نستطيع أن نميز على هذا الشكل ثلاث مناطق بجوار الشبكة المعدنية:

(1) منطقة الغمد-gaine، (2) منطقة قرب الغمد-prégaine، (3) منطقة البلازما المعتدلة-plasma

.neutre

لندرس تأثير تقطيب الشبكة المعدنية U_G (تقطيب سلبياً طبعاً) على الجسيمات المشحونة مع $U_B = 0$: تنتشر الأيونات والإلكترونات الصادرة عن الطرف المنبع باتجاه الشبكة المعدنية المقطّبة سلبياً والمحاطة بواسطة الغمد: إن الجسيمات المشحونة إيجابياً تكون مسرّعة في حين أن الجسيمات المشحونة سلبياً تكون منعكسة

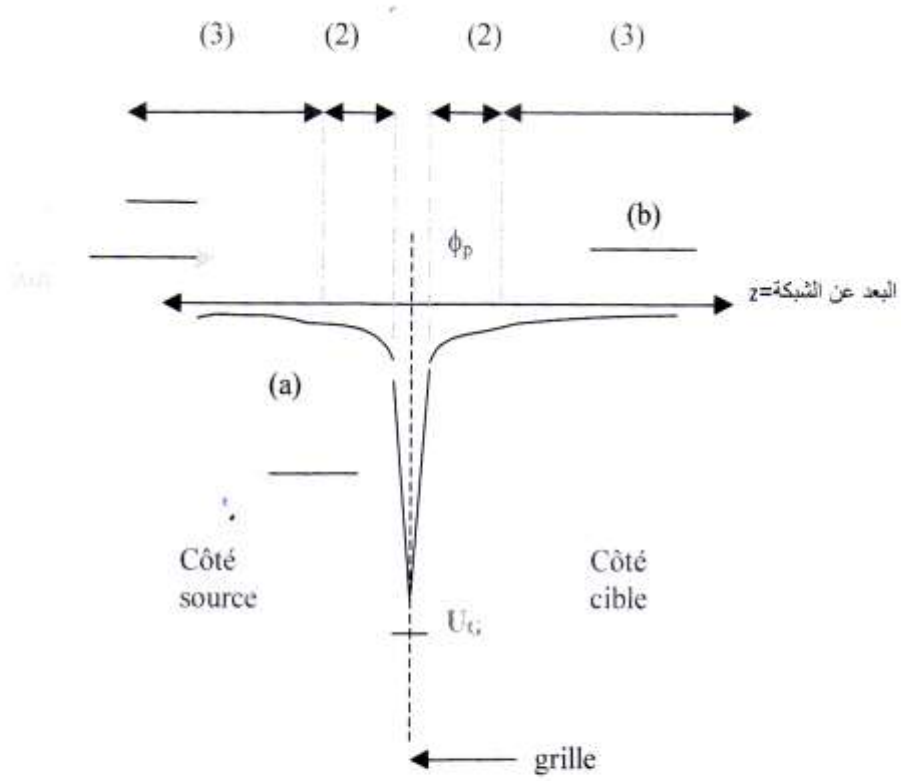
(مرندة) في مستوى قرب الغمد (prégaine) إذا كانت طاقتها أصغر من جهد التقطيب U_G المطبق على الشبكة المعدنية، (يؤخذ كمرجع طاقة البلازما لبلازما "المنبع")، أو تعبر الشبكة المعدنية إذا كانت تملك طاقة أكبر [9]. يمتد الغمد بجوار الشبكة إلى بضعة ملليمترات، من 2 mm إلى 5mm، وذلك حسب تقطيب الشبكة المعدنية. سوف نلاحظ أن الإلكترونات الابتدائية الطاقية جداً (من رتبة 40eV) هي الوحيدة القادرة على تجاوز مثل هذا الحاجز والدخول إلى الطرف "الهدف"، أما الإلكترونات الحرارية التي تملك طاقة من مرتبة 3eV فإنها غير قادرة على تجاوز ذلك الحاجز.

من جهة أخرى، من أجل ملاحظة تأثير تقطيب مصعد المنبع U_B [13]، على هذه الجسيمات، فإننا نترك الشبكة المعدنية عائمة (flottante) ونقطب المصعد المنبع، أي الأسطوانة المتممة الموضوعة داخل الوعاء في الطرف المنبع. في هذه الحالة تفقد الطاقة الكامنة للبلازما شكلها التناظري بحيث تصبح أكثر ارتفاعاً في الطرف المنبع منه في الطرف الهدف. نعرض بشكل كفي هينتها الجديدة بواسطة الرسم التخطيطي الممثل بالشكل (7) وذلك في حالة شبكة عائمة (grille flottante) موافقة لجهد تقطيب للشبكة قدره $U_G = -30V$:

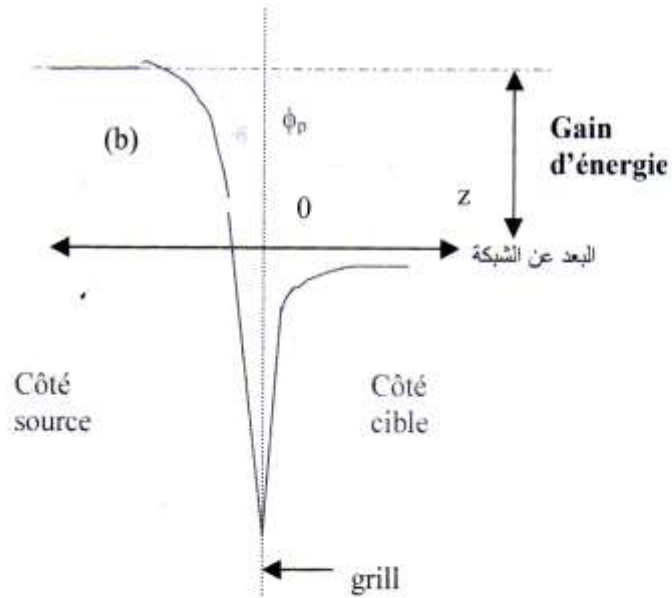
إن أيونات البلازما المنبع المحقونة باتجاه البلازما الهدف سوف تملك ربحاً في الطاقة بسبب تقطيب مصعد المنبع، وتتكون بذلك حزمة أيونات في غرفة الهدف [9, 10, 15].

يصادف في حالتنا هذه وجود عدم استقرارية (des instabilités) تنتج في البلازما الواقعة في غرفة الهدف وذلك من أجل بارامترات (متحولات) معينة، بشكل خاص سرعة الأيونات المحقونة [15, 20]. إن البارامتر (المتحول) الذي يحدد نمو التموجات هو السرعة المحقونة بها حزمة الأيونات بالنسبة إلى السرعة الصوتية الأيونية (vitesse acoustique ionique)، هذه السرعة يجب أن تكون تقريباً مساوية أو أكبر [16, 20] من السرعة الصوتية الأيونية

$$Cs \cdot v_{beam} = \left(2e \cdot \Delta\phi / M_i\right)^{1/2} \geq Cs = (k T_e / M_i)^{1/2} \quad \text{: أي يجب أن يتحقق}$$



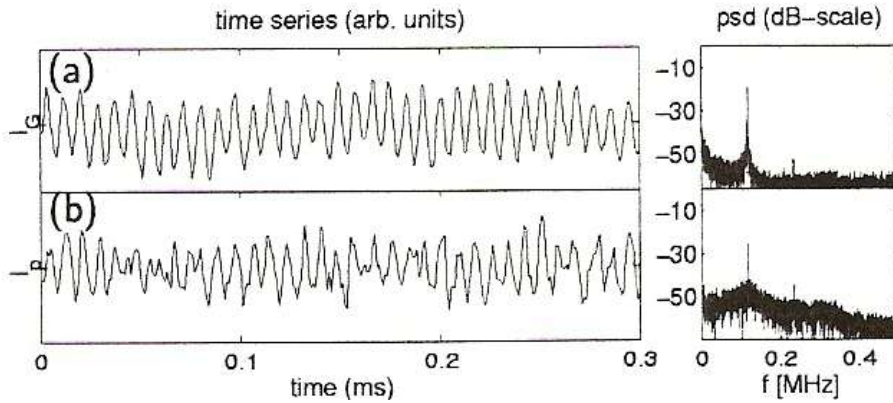
الشكل (٦): تطوّر الطاقة الكامنة للبلازما بدون تغطية مصعد المنبع. (تأثير تغطية الشبكة المعدنية على الجسيمات المشحونة)



الشكل (٧): تطوّر الطاقة الكامنة للبلازما مع تغطية مصعد المنبع. (تأثير تغطية المصعد على الجسيمات المشحونة)

2- عدم الاستقرارية الصوتية الأيونية منخفضة التردد:

في التشكيل الموصوف أعلاه، فإنّ الطاقتين الكامنتين للبلازما المنبع والبلازما الهدف موجبتان قليلاً بالنسبة لمصعد كلّ منهما وذلك كما هو محدد من ميزات المسبر. فعندما لا يكون هناك فرق في الطاقة الكامنة مطبق بين المصعدين تكون قيمة كلّ منهما (2 ± 0.5) volts مع تابعية طفيفة لكثافة البلازما. عندما تكون كثافة البلازما المنبع وكثافة البلازما الهدف متقاربتين ولا يوجد هناك فرق في الطاقة مطبق بين هاتين البلازمتين، فإنّ لاستقرارية (instabilité) تظهر بتدرّد نموذجي قيمته 120kHz ، أي عشر (1/10) تدرّد البلازما الأيوني. من أجل فرق طاقة قدره $\Delta\phi = 0.7\text{V}$ بين المصعدين المنبع والهدف، ومن أجل جهد تقطيب للشبكة قدره $U_G = -65\text{V}$ ، فإنّ سلسلة زمنية لإشارة تيار الشبكة المتناوب ac وأخرى لإشارة تيار إشباع الإلكترونات الملتقطة اللتين تمّ تسجيلهما بواسطة المسبر الموجود في الطرف الهدف قد تمّ تمثيلهما على الترتيب في الشكلين (a-8) و (b-8) مع طيفي التردد الموافق لكل منهما.



الشكل(8): a- سلسلة زمنية لإشارة تيار الشبكة، b- إشارة تيار إشباع الإلكترونات المسبر. مع طيف التردد الموافق لكل منهما

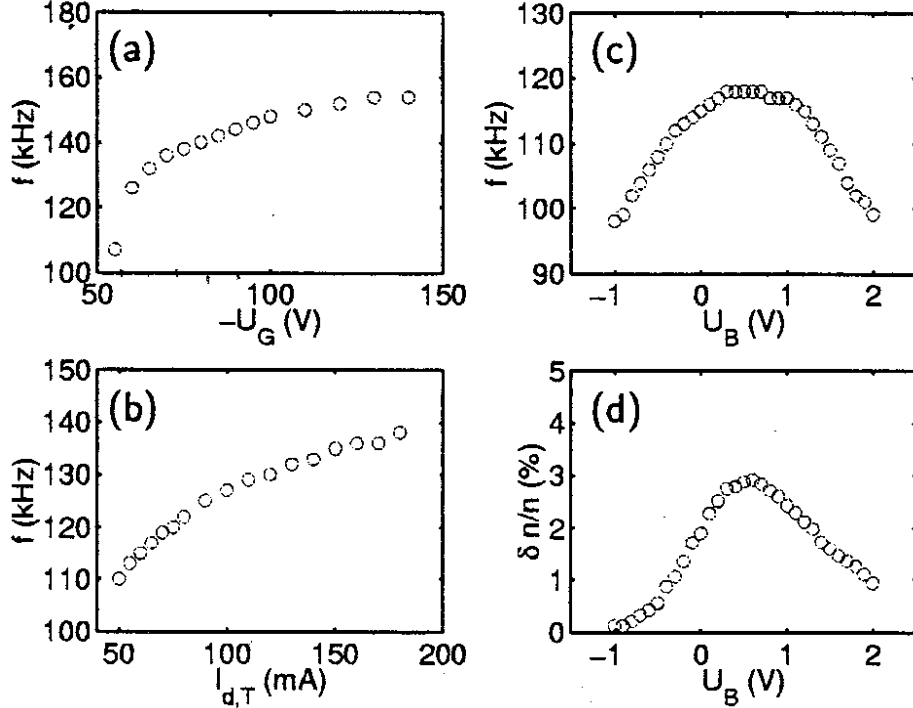
لقد تمّت دراسة علاقة تردد اللااستقرارية السابقة f (بالطبع اللااستقرارية الصوتية الأيونية) مع متغيرات (بارامترات) مختلفة للانفراغ الكهربائي، كجهد تقطيب الشبكة وتيار الانفراغ الكهربائي في البلازما الهدف وأيضاً جهد تقطيب المصعد المنبع، وتمّ جمع النتائج التجريبية في الشكل(9).

نلاحظ على الشكل(a-9) أنّه بزيادة تقطيب الشبكة يزداد التردد في البداية بشدة إلى أن يصل تيار الأيونات ضمن الغمد(الأيونات الداخلة إلى الغمد) إلى حالة الإشباع وترتدّ جميع الإلكترونات الابتدائية (الطاقية) [9]. بعد حالة الإشباع لتيار الشبكة، يستمر التردد في الازدياد ببطء. من أجل جهد تقطيب كبير نسبياً للشبكة ($|U_G| > 150\text{V}$) تختفي اللااستقرارية.

كما يبيّن الشكل(b-9) أنّ تغيّر التردد لهذه اللااستقرارية (instabilité) مع تيار الانفراغ $I_{d,T}$ ($I_{décharge, Target}$) في الغرفة الهدف والمتناسب مع كثافة البلازما الهدف يخضع لقانون جذر تربيعي، الأمر الذي يعني تناسبه مع تردد البلازما.

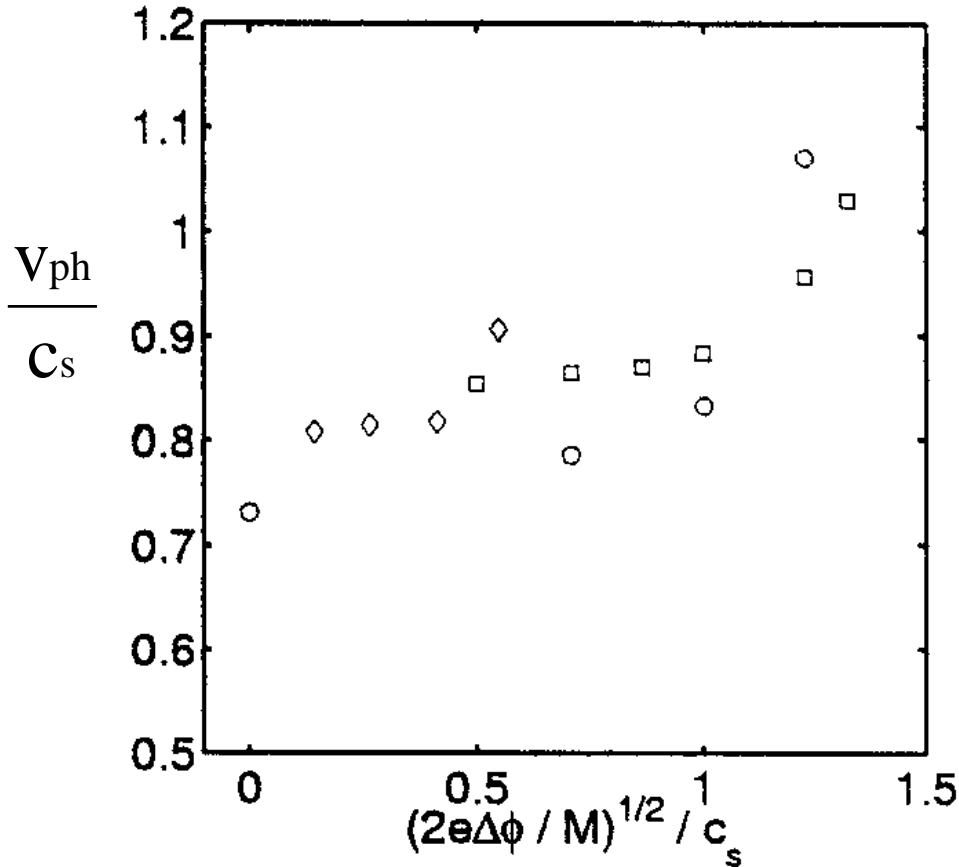
أما الشكلان (c-9) و (d-9) فيظهران على الترتيب تابعية كل من تردد (f) وسعة ($\delta n/n$): التموّج النسبي للكثافة (الإلكترونية) اللااستقرارية لجهد تقطيب المصعد المنبع U_B . هذه التبعية تعكس بوضوح مدى حساسية الوضع التناظري (symétrique) حول الشبكة. نلاحظ أيضاً بأنّه يوجد رنين-résonance (في جوار الـ 120kHz)

من أجل مصعد منبع عائم (anode flottante) موجب قليلاً (حوالي جزءاً من الفولت) يوافق تموجاً نسبياً للكثافة (أي: سعة اللاستقرارية) في حدود الـ 3% [8]. نفيد بالذكر أنه عندما تمّ الانحراف عن القيمة $\Delta\phi = 0.7V$ (التي تمثل فرق الطاقة بين المصعدين المنبع والهدف) سواءً بقيم موجبة أم سالبة، فإنّ كلاً من التردد والسعة قد بدأ بالهبوط.



الشكل (9): تابعة تردد اللاستقرارية f لجهد تقطيب الشبكة U_G الممثل بالرسم (a)، ولتيار الانفراغ الكهربائي $I_{d,T}$ للبلازما الهدف الممثل بالرسم (b)، ولجهد تقطيب المصعد المنبع U_B الممثل بالرسم (c). كما تمّ أيضاً رسم تابعة التغير في السعة (تموجات الكثافة الإلكترونية $\delta n/n$) مع جهد تقطيب المصعد المنبع U_B الممثل بالرسم (d).

لقد تمّ تحديد سرعة الطور (سرعة الانتشار) v_{ph} للإشارة المنتشرة في البلازما الهدف من أجل سرعات حقن مختلفة $v_{beam} = (2e\Delta\phi/M_i)^{1/2}$. وقد تمّ رسم النتائج في الشكل (10) الذي يحتوي على ثلاثة منحنيات تمثلها ثلاثة قياسات مختلفة محدّدة بالرموز (\diamond ، \square ، \circ) حيث إن السرعتين v_{ph} و v_{beam} منسويتان إلى السرعة الصوتية الأيونية $C_s = (kT_e/M_i)^{1/2}$ في البلازما الهدف. إنّ السرعة المكافئة للفارق الطّاقّي بين المصعدين يمثلها المحور الإحداثي الأفقي، حيث إنّ سرعة الحقن الحقيقية يمكن أن تكون منزاحة قليلاً عنها. إنّ سرعة الطور (سرعة الانتشار) المقاسة هي تقريباً $0.8 C_s$. هذه السرعة تبقى ثابتة تقريباً من أجل سرعات حقن منخفضة وتزداد فقط باتجاه الحد الأعلى لسرعات الحقن التي من أجلها تمّت ملاحظة اللاستقرارية.



الشكل (10): سرعة الطور (سرعة الانتشار) v_{ph} للإشارة المنتشرة كتابع لسرعة الأيونات المحقونة (سرعة الحزمة الأيونية) $v_{beam} = (2e\Delta\phi / M)^{1/2} / c_s$ ، حيث $C_s = (kT_e / M_i)^{1/2}$ محسوبة من الفرق الطاقي بين المصعدين. الرموز المختلفة (○، □، ◇) تمثل ثلاثة قياسات مختلفة.

إنّ السرعة الطورية (سرعة الانتشار) المقاسة هي من مرتبة ما هو متوقّع للاستقرارية الصوتية الأيونية لمنظومة "حزمة أيونات-بلازما" من أجل قيم سرعات حزم محصورة بين مرة ومرتين من السرعة الصوتية الأيونية (أي: $C_s \leq v_{beam} \leq 2C_s$). وهذا يوافق فروق طاقة كامنة بين مصعدي البلازما "المنبع" والبلازما "الهدف" محصورة بين 1.5V و 6V (أي: $1.5V \leq \Delta\phi \leq 6V$). بكل الأحوال وكيفما كان الوضع فإنّ تدرجاً صغيراً في الطاقة الكامنة $\Delta\phi$ يمكن أن يكون كافياً لأن يجعل أيونات الحزمة تدخل غمد الشبكة الواقع في الطرف المنبع بسرعة أكبر من السرعة C_s .

إنّ شرط اللاستقرارية يمكن أن يتحقق محلياً في منطقة العبور بين غمد الشبكة والبلازما الهدف. ففي تلك المنطقة تبقى كثافة البلازما الهدف مرتفعة بشكل كافٍ، وبالتالي فإنّ الأيونات القادمة من البلازما المنبع يمكنها تماماً أن تمتلك السرعة المطلوبة والتي هي من المرتبة الواقعة في المجال $C_s \leq v_{beam} \leq 2C_s$.

نشير هنا إلى أنّه خارج حدود الشروط التي تنشأ عندها اللاستقرارية (وبالتحديد هنا الشرط السفلي $v_{beam} \leq C_s$)، فإنّه لم نتمكن من الكشف عن أيّة حزمة أيونية كانت قد انفصلت عن الإسكان الأيوني لأيونات البلازما باستخدام المحلّل الإلكترونياتكي الموصوف أعلاه وذلك بسبب محدودية قدرة الفصل لهذا المحلّل. (التطابق بين القمتين المذكورتين سابقاً على تابع توزّع الأيونات واللّتين تمثلان أيونات البلازما وأيونات الحزمة).

في الحقيقة يمكننا التغلب على المشكلة السابقة المتعلقة بمحدودية قدرة الفصل بإجراء القياسات باستخدام الفلورة المُحَنَّة بالليزر (fluorescence induite par laser)، فهو أداة تشخيص فعالة جداً استخدمت في أعمال سابقة عديدة جداً [3, 19]. هذه الطريقة في القياس تزودنا بقدرة فصل أفضل في تحديد تابع توزع الأيونات (خصوصاً قدرة الفصل بين القمتين على تابع التوزع الموافقتين لأيونات البلازما ولأيونات الحزمة). للأسف لم تتوفر لدينا تلك المنظومة التجريبية حالياً، لكنها خطوة جادة في طور البحث.

الاستنتاجات والتوصيات:

في مجمل عملنا هذا كنا قد وصفنا آلة البلازما المضاعفة متعددة القطبية، وبيننا آلية حدوث الانفراغ الكهربائي فيها وبالتالي كيفية خلق البلازما وتكوينها وعرضنا المتغيرات النموذجية لهذا الانفراغ والمتحولات الأساسية لكل من البلازمتين. وقد ساعدنا في ذلك أدوات التشخيص الكلاسيكية المتمثلة بمسابر لانغمير وبالمحلل الإلكترونيستاتيكي التي تم وصفها أيضاً. كما ساعدنا في ذلك أيضاً أنظمة القياس المتمثلة بنظم اقتناء البيانات وتسجيلها وتحليلها والتي تم شرحها أيضاً.

تم التطرق أيضاً إلى مفهوم التأثير المتبادل (ion - ion) من خلال شرح النظام "حزمة أيونات- بلازما" وإلى كيفية تحقيقه ضمن التشكيل "بلازما- مضاعفة". فقد وجدنا أنه بتطبيق فرق في الطاقة الكامنة ($\Delta\phi$) بين مصعدي البلازما "المنبع" والبلازما "الهدف" أسفر عن حقن حزمة من الأيونات سرعتها $v_{beam} = (2e \cdot \Delta\phi / M_i)^{1/2}$ في البلازما الهدف. الأمر الذي أدى إلى توليد اضطراب صوتي أيوني إلكتروستاتيكي في البلازما الهدف.

من أجل متغيرات معينة، كان قد تم الكشف عن لاستقرارية صوتية أيونية منخفضة التردد في البلازما الواقعة في غرفة الهدف وذلك من خلال حقن حزمة من الأيونات ذات سرعة تم اختيار قيمتها بين السرعة الصوتية الأيونية Cs وضعفي هذه القيمة $2Cs$. وقد تبين لنا بشكل خاص أن سرعة الحقن تلك هي المتغير الأساسي من بين جميع المتغيرات الذي يحدد نمو التموجات للكثافة وبالتالي نشوء اللاستقراريات الصوتية الأيونية خصوصاً عند ترددات منخفضة. هذه السرعة يجب أن تكون تقريبا مساوية للسرعة الصوتية الأيونية أو أكبر منها $Cs = (k T_e / M_i)^{1/2}$ ، وهي تولف الشرط الأساسي لظهور اللاستقرارية.

في خطوات لاحقة سوف يتم تشخيص كل من البلازمتين المنبع والهدف (قياس متحولات البلازما)، وكذلك تحليل طاقة الأيونات (قياس طاقة أيونات البلازما وأيونات الحزمة المحقونة) باستخدام الفلورة المُحَنَّة بالليزر ومقارنة النتائج التي سنحصل عليها مع نتائج بحثنا هذا الذي استخدم فيه أدوات تشخيص كلاسيكية (مسابر لانغمير ومحلل طاقة إلكتروستاتيكي) وذلك لمعرفة ما إذا كان ممكناً للاستقرارية أن تنشأ خارج حدود الشروط التي حددناها وبالتحديد الشرط السفلي $v_{beam} \leq Cs$.

المراجع:

- [1] CARRÈRE, M. ; CHÉRIGIER, L. ; ARNAS-CARPEAU, C. ; BACHET, G. ; DOVEIL, F. *Steady state behavior of a multipolar plasma devic.* Review of Scientific Instruments, USA, Vol. 67,N° 12, **1996**, 4124-4129.
- [2] BACHET, G. ; CHÉRIGIER, L. ; DOVEIL, F. *Ion velocity distribution function observation in a multipolar argon discharge.* Physics of Plasmas, USA, Vol. 2, N° 5, **1995**, P. 1782-1788.
- [3] BACHET, G.; CHÉRIGIER, L. ; CARRÈRE, M. ; DOVEIL, F. *Laser-induced fluorescence observations of a multipolar argon discharge.* Physics of Fluids B, USA, Vol. 5, N° 8, **1993**, 3097-3102
- [4] BOHM, D. *in The characteristics of electrical discharges in magnetic fields.* 1st ed., Mc Graw-Hill, USA, **1949**, 376.
- [5] SARMA, A. ; BAILUNG, H. ; CHUTIA, J. *Observation of beam-enhanced sheath instability in a double plasma device.* Physics of Plasmas, USA, Volume 3, N°9, **1996**, 3245-3250.
- [6] SARMA, A. ; BAILUNG, H. ; CHUTIA, J. *Characteristics of sheath instability in a double plasma device.* Physics of Plasmas, USA, Volume 4, N°1, **1997**, 61-68.
- [7] OHNO, N. ; KOMORI, A. ; TANAKA, M. ; KAWAI, Y. *Instabilities associated with a negative rf resistance in current-carrying ion sheaths.* Physics of Fluids B: Plasma Physics, USA, Vol. 3, N° 1, **1991**, 228-235.
- [8] POPA, G. ; SCHRITTWIESER, R. W. *Resonant coupling between ion bounce in a potential well and the potential relaxation instability.* Physics of Plasmas, USA, Volume 1, N°1, January **1994**, 32-42.
- [9] PIEL, A. ; KLOSTERMANN, H. ; ROHDE, A. ; JELIC, N. ; SCHRITTWIESER, R.W. *Ion sheath oscillations in double plasma machines.* Physics Letters A, UK, Vol. 216, N° 6, **1996**, 296-302.
- [10] KLOSTERMANN, H.; ROHDE, A.; PIEL, A. *Van der pol behavior of virtual anode oscillations in the sheath around a grid in a double plasma device.* Physics of Plasmas, USA, Volume 4, N°7, **1997**, 2406-2412.
- [11] KLINGER, T.; GREINER, F.; ROHDE, A ; PIEL, A. *Van der pol behavior of relaxation oscillations in a periodically driven thermionic discharge.* Physical Review E, USA, Volume 52, N°4, **1995**, 4316-4327.
- [12] ROHDE, A.; KLOSTERMANN, F.; PIEL, A. *Particul-in-cell simulation of grid sheath oscillations in a double-plasma device.* Physical Review E, USA, Volume 25, N°5, **1997**, 1144-1149.
- [13] PHUKHAN, A. ; MISHRA, M. K. ; SAIKIA, B. K. ; CHAKRABORTY, M. *Variation of plasma parameters in a modified mode of plasma production in a double plasma device.* Pramana - journal of physics, India, Volume 74, Number 3, **2010**, 399-409.
- [14] PHUKHAN, A. ; MISHRA, M. K. ; CHAKRABORTY, M. *Mechanical variations of diffused plasma parameters in a double plasma device.* Journal of physics D, Applied physics, UK, vol. 40, N° 12, **2009**, 3616-3619.
- [15] MISHRA, M. K. ; PHUKHAN, A. ; CHAKRABORTY, M. ; GOSWAMI, K. S. *Growth of electron energies with ion beam injection in a double plasma device.* The European physical journal D, Atomic, molecular and optical physics, India, Volume 46, N° 2, **2007**, 303-306.

- [16] SCHUMACHER, U. *Basics of plasma physics*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, **2005**, 95-116.
- [17] PIEL, A. *Waves in plasmas*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, **2005**, 21-50.
- [18] WAGNER, F. ; WOBIG, H. *Magnetic confinement*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, **2005**, 137-172.
- [19] GRULKE, O. ; KLINGER, T. *Observation of plasma fluctuations*. Lecture notes in physics, Plasma physics, Germany, vol. 670, **2005**, 375-398.
- [20] DELCROIX J-L. ; BERS A. *Physique des plasmas*, InterEditions / CNRS Edition, France, vol. 1 & 2, **1994**, vol.1-375, vol.2-499.
- [21] KUNZE, H-J. *Introduction to Plasma Spectroscopy*. Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics, Germany, Volume 56, **2009**, 179-205.
- [22] Robert L. Merlino. *Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics*. American Association of Physics Teachers. USA, Vol. 75, No. 12, **2007**, 1078-108.

