المجلد 4، العدد 2، 2011. ص.ص 97-105

المجلة الأردنية للفيزياء

ARTICLE

تشابه التصرف مع علاقة باشن في التفريغ الراديوي في غاز الأركون

ياسر عبد الجواد عبد الله الجوادي

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الموصل، الموصل، العراق.

Received on: 20/6/2011; Accepted on: 26/9/2011

الملخص: تم في هذا البحث استخدام منظومة تجريبية للتفريغ التوهجي الراديوي الحثي بتردد 13.56 ميكاهرتز لدراسة العلاقة بين ضغط غاز الأركون داخل حجرة التفريغ والقدرة اللازمة لإحداث الانهيار التوهجي. أظهرت النتائج العملية أن تلك العلاقة رغم تشابهها في بعض الخواص العامة مع معادلة باشن إلا أن معادلة باشن بشكلها التقليدي الذي يصف التفريغ باستخدام الجهود المستمرة لا يمكن ان تعطي وصفا كميا جيدا لتلك النتائج. على هذا الأساس تم إجراء تحوير على المعادلة مما أدى إلى الوصول إلى توافق جيد مع النتائج العملية. كما أظهرت الدراسة وجود انعكاسات واضحة لعلاقة باشن على طبيعة عملية الانتقال من النمط السعوي إلى النمط الحثي للتفريغ.

Paschen like Behavior in Argon RF Discharge

Yaser Al-Jwaady: *Physics Department, College of Science, Mosul University, Mosul, Iraq.*

Abstract: A 13.56 MHz radio frequency inductively coupled discharge system is used in this work to study the relation between Argon gas pressure in the discharge chamber and the threshold breakdown RF power needed to create the discharge. Experimental results indicated that although the data involve some features related to the traditional Paschen relation used in DC discharges, this relation cannot provide a quantitative description of experimental data. For such reason, a modified form of Paschen relation is suggested. The modified relation provides good agreement with experimental data. Furthermore, it seems that the Paschen relation will have significant reflections on the behavior of the transit process from capacitive to inductive discharge. This is demonstrated by studying the transit region.

PACS: 52.25-b Plasma Properties-51.50+V Electrical Properties.

Keywords: RF Plasma; Breakdown plasma; Paschen; Glow Discharge.

المقدمة

على الرغم من العدد الهائل من الدراسات المتعلقة بالانهيار الكهربائي التوهجي باستخدام الجهود المستمرة التي تتوفر خلال المئة سنة الماضية حيث شملت تلك الدراسات مختلف الغازات والضغوط والترتيبات الهندسية [1-5] إلا أن ما يماثل تلك الدراسات قدر تعلق الأمر بالتفريغ التوهجي الراديوي قليل نسبيا على الرغم من الاستخدام الواسع لهذه التقنية في الكثير من التطبيقات المتعلقة بمعالجة السطوح.

قد يكون السبب في قلة هذا النوع من الدراسات هو السهولة النسبية التي يمكن بواسطتها إحداث هذا النوع من التفريغ بشقيه السعوي والحثي. لذلك فإن مسألة الاهتمام بالحدود الدنيا لشروط إحداث الإنهيار لم تلاق اهتماما كبيرا لدى الباحثين. على الرغم من

Corresponding Author: Yaser Al-Jwaady. **Email**: yaseraljwaady@yahoo.com.

ذلك فان هناك بعض المحاولات لدراسة هذا الموضوع نورد منها قيام Lisovskiy and Yegorenkov [6] بدراسة موسعة شملت مدى واسعاً من الضغوط لعلاقة جهد التفريغ التوهجي مع الضغط في الأركون والهيدروجين والهواء توصلا من خلالها وجود التواء في منحنيات العلاقة بين الضغط وجهد التفريغ باستخدام مجالات هجينه مستمرة راديوية بتردد 10 ميكاهرتز. ومن أهم التأثيرات التي تمت مناقشتها تولد توافقيات ذات طول موجي يساوي ضعف الطول الموجي الأصلي وبينوا بان هذا التأثير سوف يعطي منحني تفريغ يختلف بدرجة كبيرة عن المنحني الناتج عن الترددات النقية. كما قام Park وجماعته [7] بدراسة علاقة جهد الانهيار تحت الضغط الجوي مع المسافة الفاصلة بين القطبين في التفريغ الراديوي السعوي بتردد 13.56 ميكاهرتز في غاز الهليوم الذي أضيف إليه كميات صغيرة من الأركون أو الأوكسجين أو النيتروجين وبينوا أن علاقة جهد الانهيار تشابه إلى حد كبير الجهة اليمنى من منحنى باشن رغم اعتماد تلك العلاقة على التردد بدرجة كبيرة. كما بين Lisovskiy وجماعته [8] وجود تشابه بين علاقة جهد الانهيار باستخدام الترددات الراديوية المختلفة في التفريغ السعوي في حالة تحقق شرط كون حاصل ضرب التردد والمسافة بين الأقطاب متساويا. قدم Moon وجماعته[9] نتائج تجريبه لعمليات الانتقال من النمط α إلى النمط γ للتفريغ العادي وفوق العادي في التفريغ التوهجي الراديوي السعوي باستخدام تردد 13.56 ميكاهرتز. وبينوا أن هناك تشابها مع منحني باشن.

المنظومة التجريبية

تتكون المنظومة التي تم استخدامها وكما موضح في الشكل (1) من حجره زجاجيه اسطوانية محاطة بملف اسطواني متصل بمصدر الموجات الراديوية 13.56 ميكاهرتز المصنع من قبل شركة Coaxial Power Systems Ltd والذي تبلغ قدرتة القصوى 600 واط. يتصل المصدر بملف الحث المحيط بحجرة التفريغ من خلال منظومة موائمة اوتوماتيكية مصنعة من قبل الشركة ذاتها. تتصل الحجرة إضافة إلى فتحة تفريغ الغاز بمنظومة ثنائية الصمامات لإدخال الغاز والتحكم بالضغط داخل الحجرة وبالاستعانة بمقياس الضغط المتصل بالحجرة.

إن النقطة الأساسية في هذا العمل هي محاولة معرفة النقطة التي يبدأ عندها التفريغ التوهجي بالحدوث. إن الاعتماد على الملاحظة البصرية لظهور التوهج لا يمكن أن يوفر مقياسًا دقيقًا، لذلك فقد تم تصميم منظومة الكترونية يمكنها التحسس السريع والدقيق ليس فقط بلحظة بدء التفريغ التوهجي بل بطريقة تطوره مع زيادة القدرة.

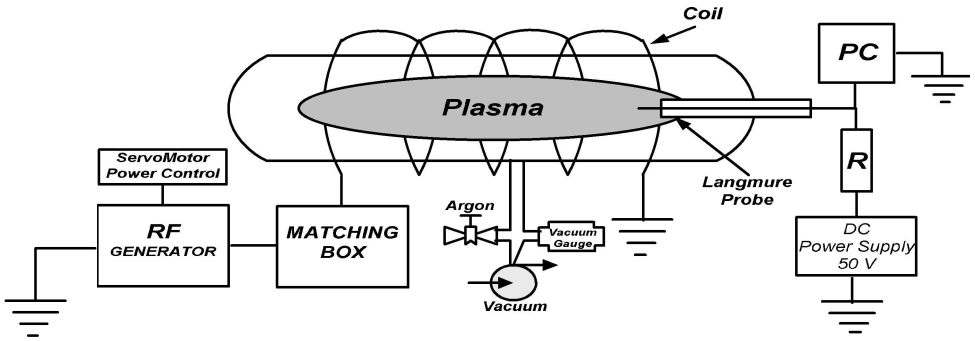
تعتمد المنظومة في الأساس على وضع مجس كهربائي داخل الحجرة. يتكون المجس من سلك من التنكستن قطره 0.5 ملم محاط بجدار زجاجي بشكل كامل عدا الجزء المعرض للبلازما والبالغ طوله 1 ملم. يكون هذا المجس ذا جهد موجب بدرجة كبيرة إلى الحد الذي يجعله ضمن منطقة عمل تيار التشبع الالكتروني لمجس لانكمور. إن حصول أي تفريغ داخل الحجرة سيؤدي إلى تكون تيار الكتروني في المجس. تم ربط المجس الى دائرة اكتساب بيانات حاسوبية تقوم بتسجيل تيار المجس بشكل متناغم مع تغير القدرة الراديوية المسلطة على الملف. ولأجل الحصول على التناغم الذي ورد ذكره فقد تم تصميم الية كهروميكانيكية تتضمن وجود محرك كهربائي صغير يقوم بتغيير القدرة الصادرة عن المصدر الراديوي فور البدء باكتساب البيانات عن طريق إيعاز صادر من الحاسبة. يقوم المحرك الكهربائي بتحريك بكرة زيادة القدرة للمولد الراديوي بسرعة ثابتة باستخدام دائرة تحكم الكترونية في نفس الوقت الذي تقوم فيه الحاسبة الالكترونية باكتساب البيانات الخاصة بالتيار الكهربائي المار في المجس. تم اكتساب البيانات الخاصة بتيار المجس بسرعة مقدارها 40000 قياس في الثانية الواحدة مما يضمن تحسسا دقيقا تجاه التغيرات السريعة والآنية في كثافة البلازما.

عند بدء التشغيل وعند القدرات الواطئة وعدم وجود تفريغ فان تيار المجس سيكون صفرا تقريبا. حال بدء التفريغ فان الجهد الموجب العالي للمجس سيؤدي إلى قيام المجس بسحب تيار مساوي لتيار التشبع الإلكتروني والذي بدوره يتناسب مع كثافة الالكترونات في البلازما المتولدة. إن هذا الترتيب يعطي مقياسا ليس فقط عن مقدار قدرة العتبة التي يحدث عندها التفريغ بل أيضا عن كيفية تطور كثافة البلازما مع زيادة القدرة. إن معرفة هذا التطور يؤدي إلى الحصول على معلومات مهمة تتعلق بطبيعة انتقال البلازما من طور

التفريغ السعوي إلى طور التفريغ الحثي. إن المسألة الأخيرة تعتبر من المسائل المهمة في تصميم منظومات التفريغ التوهجي الراديوي.

تم استخدام هذه المنظومة في دراسة علاقة قدرة العتبة اللازمة لإحداث الانهيار مع ضغط الغاز داخل الحجرة ولستة وعشرون قيمة لضغط غاز الأركون داخل الحجرة. وقد كانت قيم الضغط المستخدم من 0.5- 3.5 باسكال وبزيادة مقدارها 0.1 باسكال.

تمت عملية اكتساب البيانات وتحليلها باستخدام برنامج ماتلاب.

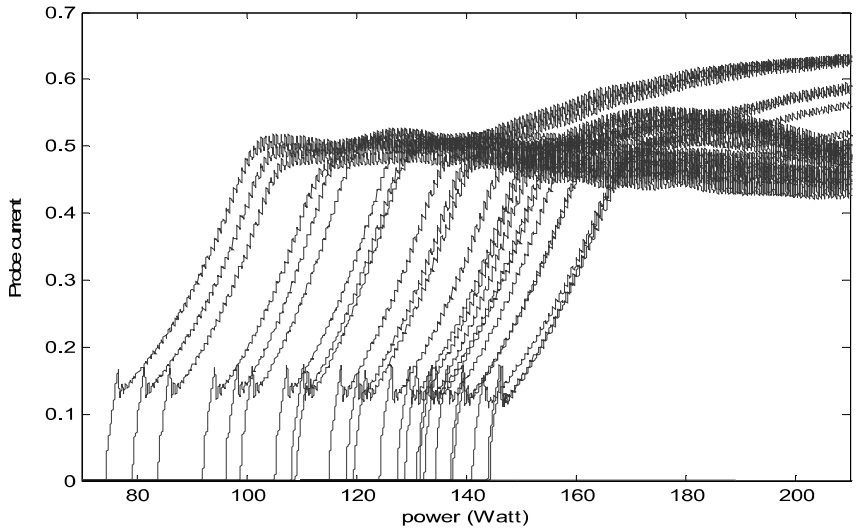


الشكل (1): مخطط للمنظومة التجريبية المستخدمة

النتائج والمناقشة

يعرض الشكل (2) مجملا لجميع النتائج التي تم تسجيلها من قبل منظومة اكتساب البيانات أثناء التجربة ولمختلف الضغوط ويبين الشكل تطور تيار المجس عند كل ضغط.

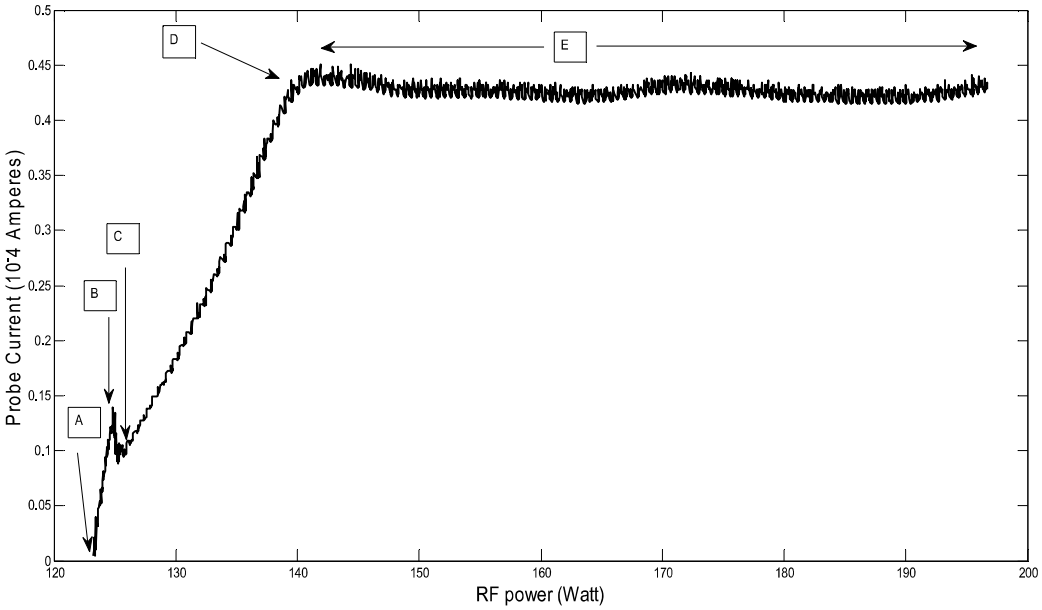
إن تسلسل ظهور المنحنيات من اليسار الى اليمين لا يمثل بالضرورة الزيادة التصاعدية في الضغط وإن تحليل العلاقة مع الضغط سيأتي لاحقا وذلك من خلال فصل كل منحنى من هذه المنحنيات على حده وإن عرض الشكل بهذه الصورة قد جاء فقط لإعطاء صورة شاملة لكل القياسات التي تم إجراؤها على رسم واحد بدلا من الحاجة إلى استخدام 26 رسما منفصلا.



الشكل (2): مجمل القياسات الخاصة بتيار المجس مع القدرة لمختلف الضغوط

ولأجل إلقاء الضوء على ما تعنيه هذه المنحنيات وبالرجوع إلى الشكل (3) فان من الممكن القول بان ما يعكسه كل من هذه المنحنيات يمثل وجود ثلاث مراحل مختلفة لتطور البلازما مع زيادة القدرة. ونظرا للتشابه الكبير في أشكال هذه المنحنيات فإنه يمكن الاستنتاج بأن طبيعة مراحل التطور لا تعتمد على الضغط ولكن قيم القدرات التي تبدأ عندها كل مرحله من المراحل بالحدوث تعتمد على الضغط طبعا.

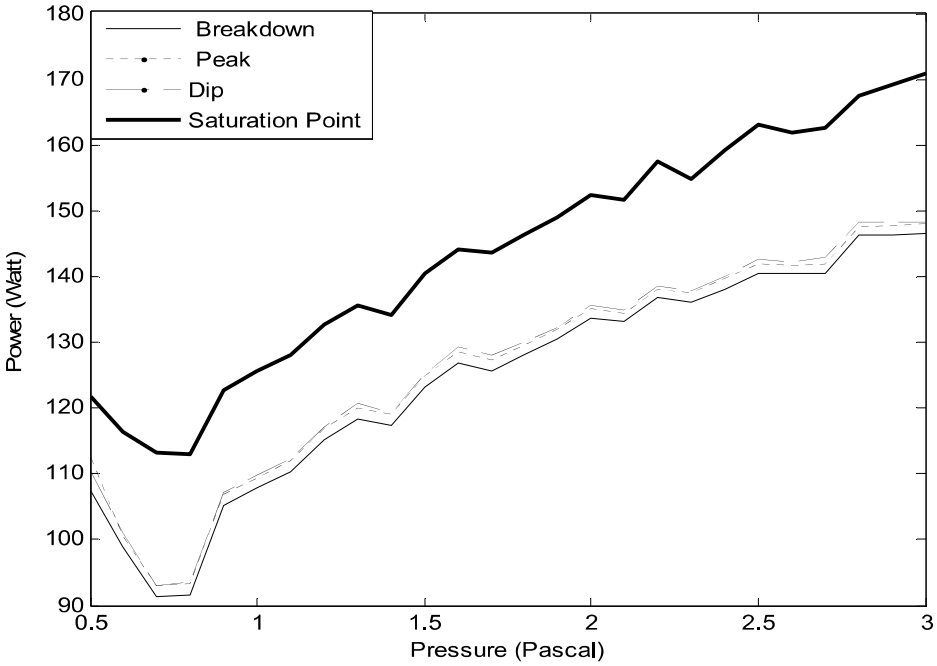
يمثل الشكل (3) رسما لأحد المنحنيات الموجودة في الشكل (2) وهو يمثل القياسات المأخوذة عند الضغط 1.5 باسكال



الشكل (3): احد منحنيات التطور عند الضغط 1.5 باسكال يبين علاقة تيار المجس مع القدرة موضح عليه مختلف نقاط التحول.

تمثل النقطة (A) اللحظة الأولى لبدء حدوث الانهيار التوهجي الذي يستغرق فترة صغيرة جدا ليكتمل معتمدا على التفريغ السعوي للوصول إلى النقطة (B) ويكاد يكون مقدار التيار الذي يسحبه المجس لجميع الضغوط عند لحظة بدء التوهج متساويا ولا يعتمد على الضغط. إن معدل قيمة فرق القدرات بين النقطة (A) و(B) ولجميع الضغوط هو $1.5 \mp 9\%$ واط وتمثل فترة زمنية تبلغ حوالي $0.1 \mp .01$ ثانية وعلى اعتبار أن مسح قيم القدرات من صفر وحتى 190 واط من قبل منظومة تغيير القدرة التي سبق وصفها هي 14 ثانية وهذه قيمة صغيرة ولم تلاحظ أي تغيرات نظامية مع الضغط.

لقد تم تحديد نقاط التحول الموضحة في الشكل (3) لجميع المنحنيات المبينة في الشكل (2) ولجميع الضغوط. تم رسم قيم القدرات التي تحدث عندها هذه التحولات في الشكل (4).



الشكل (4): علاقات تغير القدرة اللازمة لإحداث التفريغ والانتقال من مرحلة إلى أخرى.

يتبين من ملاحظة الشكل (4) إن تصرف مختلف نقاط التحول مع الضغط مشابه إلى حد كبير لتصرف القدرة اللازمة لإحداث التفريغ لأول مرة ولذلك فان التركيز سيكون على منحني القدح الأولي Breakdown المتمثل بالنقطة (A).

يكتسب الشكل (4) أهمية من ناحية كونه ولقيم الضغوط التي تقل عن 3 باسكال يشابه إلى حد كبير منحني باشن المعروف في التفريغ باستخدام الجهود المستمرة حيث يلاحظ حدوث انخفاض واضح في القدرة الراديوية اللازمة لإحداث التفريغ مع زيادة الضغط مابين 0.5 و 1.4 باسكال تعود بعدها تلك القدرات بالارتفاع مع الزيادة في الضغط.

ولأجل التحقق من هذا التصرف فقد تم مواءمة النتائج التجريبية مع علاقة محوّرة عن علاقة باشن. ولأجل توضيح التحوير الذي تم استخدامه نذكر هنا أن معادلة باشن تعطي وصفا جيدا لعلاقة جهد الانهيار بكل من الضغط والمسافة الفاصلة بين القطبين في التفريغ باستخدام المجال المستمر بالشكل:

$$V_{BK} = \frac{pd}{\ln(pd)+b} \qquad (1)$$

وهذه العلاقة يمكن إعادة كتابتها بالشكل التالي:

$$\frac{V_{BK}}{d} = E_{BK} = \frac{p}{\ln(pd)+b} \qquad (2)$$

إن تطبيق هذه العلاقة على التفريغ التوهجي الحثي بالموجات الراديوية يتطلب بعض الحذر، فإن جهد الانهيار V_{BK} في العلاقة (1) يكافئ مجالا كهربائيا مقداره E_{BK} بحيث تكون الطاقة التي يكتسبها الإلكترون من هذا المجال خلال مسافة طولها معدل طول المسار الحر مساوية أو أكبر من طاقة التأين لجزيئات الغاز ϕ أي أن:

$$e\rho E_{BK} = \phi \qquad (3)$$

حيث تمثل e شحنة الإلكترون و ρ معدل طول المسار الحر.

إن عملية ضخ الطاقة في التفريغ الحثي لا تعتمد على استخدام فرق جهد أو مجال كهربائي خارجي بل يحدث التفريغ عندما تصبح قيمة المجال الكهربائي المصاحب للمجال المغناطيسي الذي يولده ملف الحث مساويا أو اكبر من قيمة مجال الانهيار. إن عملية التفريغ الحثي تتضمن ضخ القدرة مغناطيسيا وما يتم قياسه في الحقيقة هو مقدار القدرة الداخلة إلى الملف. وإن المجال الكهربائي E المتولد داخل الغاز يرتبط بالكثافة السطحية للقدرة P بالعلاقة:

$$P = \frac{E^2}{377} \qquad (4)$$

حيث يمثل العدد 377 الممانعة الذاتية للفراغ بوحدات الأوم. أي أن المجال E سوف يتناسب مع القدرة المجهزة وبذلك فانه يمكن إعادة كتابة المعادلة (2) بدلالة القدرة بالشكل التالي:

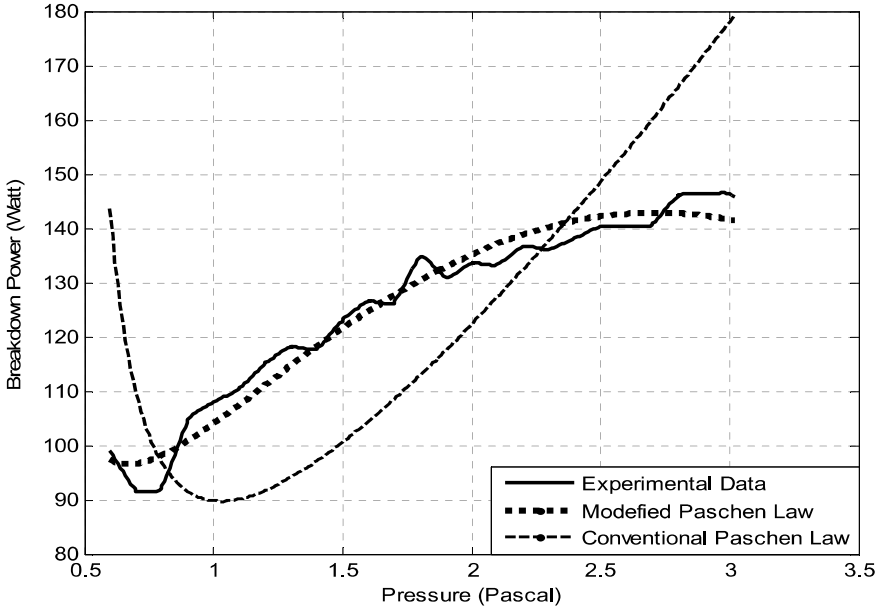
$$P_{BK} = \frac{Ap^2}{(\ln(Bp) + C)^2} \qquad (5)$$

حيث تمثل كل من A وB وC ثوابت اختيارية يمكن حسابها من مواءمة النتائج العملية مع العلاقة (5) في حين تمثل P_{BK} قدرة العتبة لإحداث التفريغ. لقد تم استبدال المسافة بين القطبين d والمعامل b الذي يعتمد على كل من نوع الغاز ومادة الأقطاب في المعادلة (2) بالثابت الاختياري B الذي يعتمد على الابعاد الهندسية لحجرة التفريغ والثابت C على التوالي في حين يتضمن الثابت A معاملات التحويل الأخرى.

تمت عملية مواءمة النتائج العملية للعلاقة بين مقدار القدرة الراديوية المتولدة من المصدر واللازمة لإحداث الانهيار وبين الضغط ويوضح الخط المنقط في الشكل (5) نتائج المقارنة بين النتائج العملية ونتائج المواءمة مع المعادلة (5). يتضح هنا ان التوافق بين النتائج في الحالتين هو ضعيف جدا خصوصا عند الضغوط العالية حيث تعطي المعادلة (5) قيما أعلى لقدرة الانهيار من النتائج العملية مما يدل على أن المعادلة (5) لا تصلح كأساس لوصف العلاقة بين قدرة الانهيار والضغط. إن السبب في ذلك قد يعود إلى وجود المجال المغناطيسي المتغير للموجات الراديوية الذي يعمل على زيادة عدد التصادمات غير المرنة نتيجة لتأثيره في جعل الالكترونات تسلك مسارات لولبية بين كل تصادمين مما يودي إلى سهولة أكبر في إحداث التفريغ. إن عدد التصادمات يزداد بزيادة الضغط لقد جرت في السابق محاولات لاستخدام علاقات محوّرة عن معادلة باشن تحت ظروف معينة نذكر منها ما قام به Carazzetti وShea [10] باستخدام صيغة محوّرة عن معادلة باشن لتطبيقها على الحالات التي تكون فيها المسافة بين القطبين صغيرة جدا (10-500) مايكرون ولذلك فانه قد يكون من المفيد التعبير عن تأثير المجال المغناطيسي أعلاه عن طريق تحوير المعادلة (5) بإضافة حد آخر يعتمد على الضغط بشكل أو بآخر وبذلك تأخذ هذه المعادلة الشكل التالي

$$P_{BK} = \frac{Ap^2}{(\ln(Bp) + C)^2} + Dp^n \qquad (6)$$

حيث n, D هي ثوابت مواءمة حرة جديدة ولقد وجد من خلال إجراء المواءمة بان المعادلة (6) تتوافق مع النتائج العملية بشكل أفضل من المعادلة (5) وتبين إن أفضل توافق يكون باستخدام n = 2 أي أن الحد الإضافي يتناسب مع مربع الضغط. ويوضح المنحني المنقط في الشكل (5) مدى التوافق بين النتائج العملية والمعادلة (6).



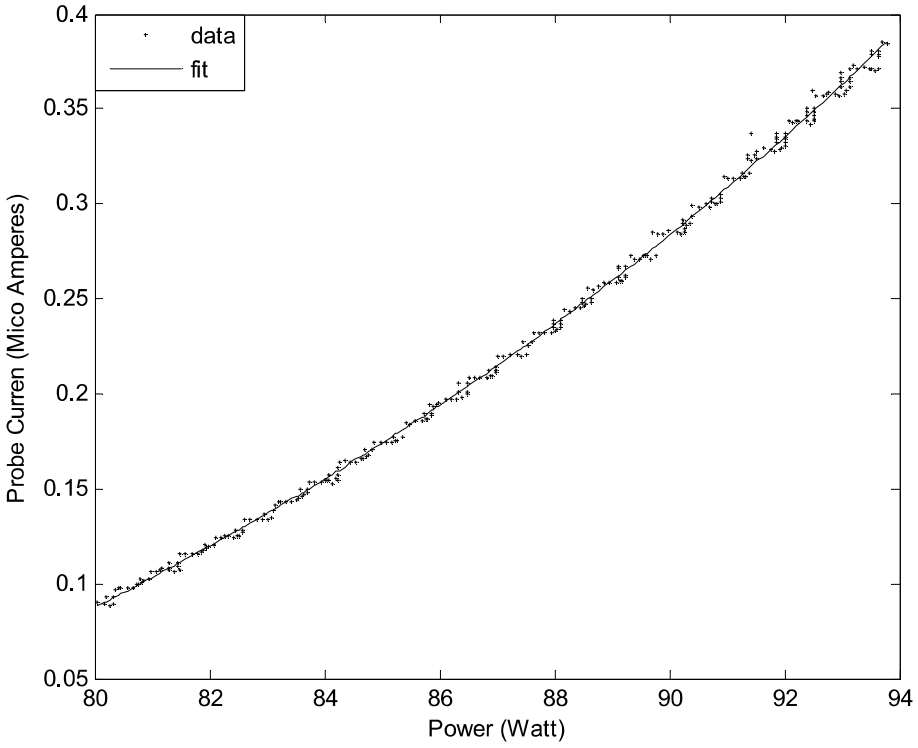
الشكل (5): مقارنة النتائج العملية للعلاقة بين الضغط وقدرة القدح مع كل من معادلة باشن العامة وعلاقة باشن المحورة.

تمثل المنطقة المحصورة بين النقطتين D, C في الشكل (3) عملية الانتقال من التفريغ السعوي إلى التفريغ الحثي. ولأجل محاولة معرفة طبيعة عملية الانتقال هذه فقد تم عزل النقاط المحصورة بين D, C لجميع المنحنيات في الشكل (1) وتم إجراء عمليات مواءمه مع المعادلة التجريبية:

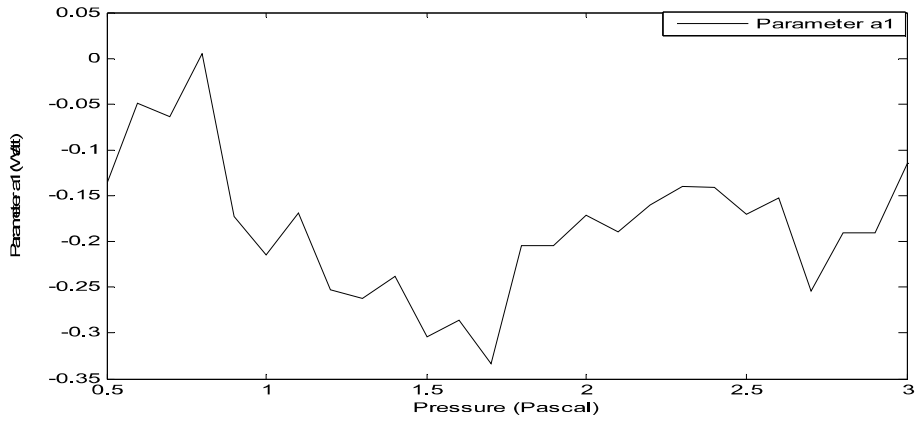
$$P = a_1 + a_2 e^{p/a_3} \qquad (7)$$

حيث تمثل كل من P و p القدرة والضغط على التوالي في حين تمثل كل من a_3, a_2, a_1 معاملات تجريبية حرة. ويبين الشكل (6) إحدى نتائج عملية المواءمة بين القياسات العملية للمنطقة D,C مع العلاقة التجريبية (7).

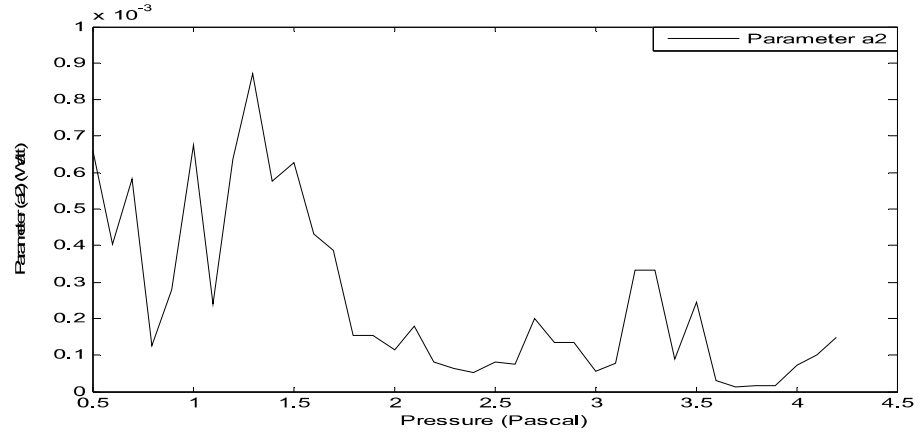
إن الأشكال عند جميع الضغوط تسلك سلوكًا مشابهًا للشكل (6) حيث تم الحصول على نتائج مواءمة جيدة جدا في جميع الحالات وبدرجة ثقة تزيد عن 95% وهو اقل قيمه لقبول نتائج المواءمة لبرنامج ماتلاب الذي تم استخدامه. بعد إجراء عمليات المواءمة تم رسم علاقة قيم المعاملات الثلاثة في المعادلة (7) مع الضغط في الأشكال (c, b, a: 7).



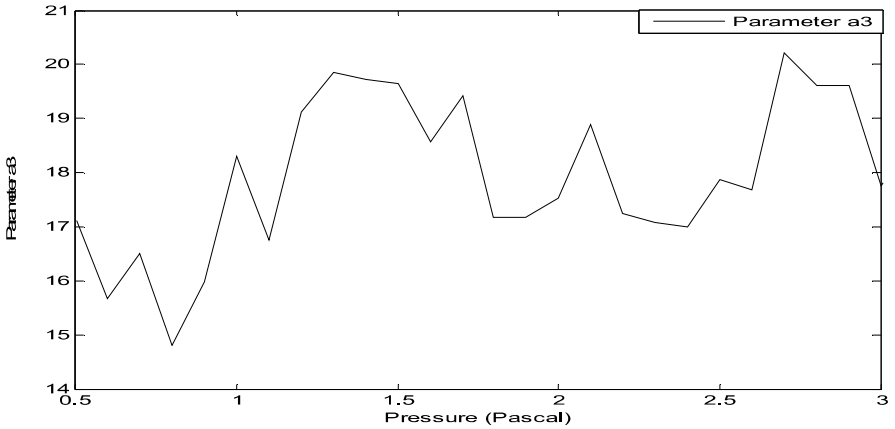
الشكل (6): إحدى نتائج عملية المواءمة بين القياسات العملية للمنطقة D,C مع العلاقة التجريبية (7).



(a)



(b)



(c)

الشكل (7): علاقات المعاملات الثلاثة في المعادلة (7) مع الضغط.

يتضح من ملاحظة تغير قيم المعاملات الثلاثة أعلاه في الشكل (7) أن أقيامها تكاد تكون ثابتة مع الضغط ضمن نطاق الأخطاء التجريبية عند قيم الضغوط التي تزيد عن 1.5 باسكال حيث تتراوح قيم الثابت a_1 في هذه المنطقة مابين -0.32 و -0.15 وتتراوح قيم الثابت a_2 مابين 0.03 و 0.3 في حين تتراوح قيم الثابت a_3 ما بين 17 و 20. أما في المنطقة التي تمثل الضغوط التي تقل عن 1.5 باسكال فيلاحظ وجود تغير كبير نسبيا بالمقارنة مع المنطقة السابقة حيث

يلاحظ أن هناك الثابت a_1 يكون أكبر بشكل عام ويتخذ قيمة موجبة عند الضغط 0.8 باسكال وهذا ما لم يلاحظ في المنطقة السابقة. كذلك فان الثوابت a_2 و a_3 تتخذ قيما أعلى في هذه المنطقة وتبلغ أقصى قيمة لها عند الضغط 0.8 باسكال. ان مقارنة هذه النتائج مع التصرف في الشكل (4) يؤدي إلى الاستنتاج بان تصرف التفريغ عند الضغط 0.8 باسكال هو ذي طبيعة خاصة حيث يمثل هذا الضغط نقطة الانتقال من الجهة اليسرى إلى الجهة اليمنى من منحنى باشن. مما يؤيد الفكرة القائلة بان التفريغ بالموجات الراديوية يشابه في بعض النواحي خواص التفريغ بالتيار المستمر.

الاستنتاجات :

يتبين مما ورد أعلاه بان طبيعة التفريغ التوهجي باستخدام الموجات الراديوية 13.56 ميكاهرتز يمكن أن توصف باستخدام معادلة محورة عن معادلة باشن يؤخذ فيها بنظر الاعتبار تأثير مركبة المجال المغناطيسي الذي يؤدي إلى تسهيل عملية التفريغ كما يمكن بوضوح ملاحظة نقطة أوطأ قدرة على المنحني. إن انعكاسات منحني باشن يمكن أن تظهر أيضا بشكل واضح إلى حد كبير في منطقة انتقال التفريغ من كونه ذات طبيعة سعوية إلى أن يصبح ذات طبيعة حثية.

المصادر:

[1]Makabe, T. and Petrovic, Z., "Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication", (Taylor & Francis Group, LLC ,2006).

[2]Boyd, T.I.M. and Sanderson, J. J., "The Physics of Plasmas", (Cambridge University Press, 2003).

[3]Raizer, Y.P., "Gas Discharge Physics", (Springer-Velag, 1987).

[4]Lieberman, M.A. and Lichtenberg, A.J., "Principles of Plasma Discharges and Material Processing", (John Wiley & Sons, 1994).

[5]Chung, T. H., *et al*., J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 1014.

[6]Lisovskiy, V.A. and Yegorenkov, V.D., J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 3349.

[7]Park, J., *et al*., J. of Appl. Phys. 89 (2001) 1.

[8]Lisovskiy, V., *et al*., EPL (Europhysics Letters) 82 (2008).

[9]Moon, S., *et al*., Phys. of Plasmas, 13 (2006) 033502.

[10]Carazzetti, P. and Shea, H.R., J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 8(3) (2009) 031305.