دراسة دور العمليات الفيزيائية المسؤولة عن انهيار غاز الأكسجين الجزيئي بأشعة الليزر: نمذجة عددية

إعداد المعيدة
مها محمد عبود بادحدح
بكالوريوس فيزياء

بحث مقدم لنيل درجة الماجستير في العلوم
(فيزياء/ بصريات كمية و أطياف)

إشراف: أ.د/ يُسر عز الدين جمال
أستاذ فيزياء البصريات الكمية و الأطياف بكلية العلوم

كلية العلوم
جامعة الملك عبد العزيز
جدة – المملكة العربية السعودية
رجـــب 1431هـــ- June, 2010G

Studying the Role of the Physical Processes Responsible For the Breakdown of Molecular Oxygen Gas by Laser Radiation: Numerical Modelling

By (Maha Mohammad O. Badahdah)

A thesis submitted for the requirements of the degree
Of Master of Science
(Physics / Quantum Optics and Spectroscopy)

Supervised By
Prof. Dr. Yosr Ezz Eldin Gamal Hassan

FACULTY OF SCIENCE
KING ABDUL AZIZ UNIVERSITY- JEDDAH
Rajab 1431 H -June 2010G

قائمة المحتويات

نموذج إجازة الرسالة

الإهداء..... أ

شكر وتقدير..... د

المستخلص.....هـ

قائمة المحتويات.....ط

قائمة الأشكال.....ع

قائمة الجداول.....ق

قائمة الرموز و المصطلحات.....خ

الفصل الأول : مقدمة و مسح مرجعي

(1-1) مقدمة 1

(1-2) ظاهرة انهيار الغازات: المسح المرجعي.....2

(1-3) آليات انهيار الغازات بواسطة أشعة الليزر.....11

(1-3-1) انهيار الغازات تحت تأثير عملية التأين متعدد الفوتونات.....15

(1-3-1-أ) القياسات العملية.....15

(1-3-1-ب) الدراسات النظرية.....19

(1 -3-2) انهيار الغازات تحت تأثير عملية برمشتراهلنج العكسية.....20

(1-3-2-أ) القياسات العملية.....21

(1-3-2-ب) الدراسات النظرية.....27

(1 -4) تطبيقات لظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر.....33

(1-5) الهدف من البحث.....34

الفصل الثاني: تحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغازات المستحث بأشعة الليزر

(2-1) مقدمة.....37

(2-2) التأثير الضوئي للكمات المتعددة.....37

(2-2-1) احتمالية التأين بعملية الامتصاص متعدد الفوتونات.....39

(2-2-2) تحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز تحت التأثير المفرد لعملية الامتصاص متعدد الفوتونات.....42

(2-3) عملية برمشتراهلنج العكسية – التأين الشلالي-.....43

(2-3-1) معدل اكتساب طاقة الالكترونات بواسطة عملية برمشتراهلنج العكسية.....45

(2-3-2) تحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تحت التأثير المفرد لعملية برمشتراهلنج العكسية.....47

(2-4) تحديد شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الغاز تحت التأثير الفعال لعملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل.....50

(2-5) الانبعاث الطيفي من منطقة الانهيار.....53

الفصل الثالث :دراسة نظرية عن الظواهر الفيزيائية المصاحبة لانهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر

(3-1) مقدمة.....54

(3-2) دراسة نظرية لظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر.....55

(3-3) نموذج زيلدووفتش وريزر.....56

(3-4) نموذج ريتوف.....58

(3-5) نموذج شان ومودي.....59

(3-6) نموذج فريد لاند.....62

(3-7) نموذج سنتياجو وروبنسون.....68

(3-8) نموذج ايفانس و جمال.....70

(3-9) نموذج ويل و روزن.....74

(3-10) نموذج تاكاهاشي و نيشي جيما.....77

الفصل الرابع: نموذج التدرج الالكتروني لدراسة انهيار غاز الأكسجين المستحث بواسطة أشعة الليزر

(4-1) مقدمة 81

(4-2) النموذج المطور.....82

(4-2-1) المفاهيم الأساسية لنموذج التدرج الالكتروني.....82

(4-2-2) عمليات كسب الالكترونات.....83

(4-2-3) عمليات فقد الالكترونات 87

(4-3) ميكانيكية الفقد.....89

(4-3-1) عمليات فقد الالكترونات 89

(4-3-2) عمليات فقد طاقة الالكترونات.....89

(4-4) عمليات كسب و فقد المستويات المثارة للجزيء 90

(4-5) حساب كثافة الجزيئات المثارة.....91

(4-6) العمليات الفيزيائية.....92

(4-7) مساحات مقطع و معاملات و معدلات العمليات الفيزيائية.....94

(4-8) طريقة الحساب.....106

الفصل الخامس: النتائج و المناقشة

(5-1) مقدمة 109

(5-2) تغير عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في ضغط الغاز – مقارنة بالقياسات المعملية.....110

(5-2-1) دالة توزيع طاقة الالكترونات.....114

(5-2-2) التكوين الزمني لكثافة الالكترونات في الحجم البؤري 116

(5-2-3) التغير الزمني لمعدل الإثارة.....118

(5-2-4) التغير الزمني لمعدل التأين.....121

(5-2-5) التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترونات.....121

(5-2-6) التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات.....124

(5-3) تأثير عمليات نمو كثافة الإلكترونات.....125

(5-4) عمليات فقد الإلكترونات.....139

(5-5) دراسة ظاهرة انهيار غاز الأكسجين عند الطول الموجي 532 nm.....146

(5-5-1) مقارنة بين القيم المحسوبة و المقاسة عملياً لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار.....152

(5-5-2) دالة توزيع طاقة الالكترونات.....152

(5-5-3) التكوين الزمني لكثافة الالكترونات في الحجم البؤري.....154

(5-5-4) التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون.....160

(5-5-5) التكوين الزمني لكثافة المستويات المثارة.....162

(5-5-6) التغير الزمني لمعدل الإثارة.....164

(5-5-7) التغير الزمني لمعدل التأين.....166

(5-5-8) التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات.....166

(5-6) تأثير عمليات نمو كثافة الإلكترونات.....176

(5-7) تأثير عمليات فقد كثافة الإلكترونات.....185

الفصل السادس: الخلاصة ونظرة مستقبلية

(6-1) الاستنتاجات.....197

(6-2) اقتراحات نظرة مستقبلية.....200

قائمة المراجع.....202

الملاحق.....209

ملخص الرسالة باللغة الإنجليزية .....a

المستخلص

يقدم هذا البحث دراسة نظرية عن انهيار غاز الأكسجين الجزيئي بواسطة مصدر لأشعة ليزر النيودميوم ياج يعمل عند الأطوال الموجية 1064 nm و 532 nm بزمن نبضة 5.5 ns على مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 190 torr إلى 3000 torr وذلك لتحديد قيمة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز كدالة في ضغط الغاز عند كل طول موجي,وكذلك العمليات الفيزيائية المسؤولة عن ظاهرة الانهيار(Evans and Gamal, 1980) .استخدم لذلك نموذج عددي سبق وضعه بواسطة إيفانس وجمال وتم تطويره ليأخذ في الاعتبار معظم العمليات الفيزيائية التي يمكن أن تحدث عند تفاعل أشعة الليزر مع غاز الأكسجين الجزيئي (Gamal and Omar, 2001). طبقت الحسابات لتفسير القياسات العملية التي أجريت بواسطة فوك (Phuoc,2000) لدراسة ظاهرة انهيار غاز الأكسجين كأحد مكونات الهواء الجوي.أخذ النموذج في الاعتبار عملية برمشتراهلنج العكسية كعملية تؤدي إلى اكتساب الالكترونات طاقة من المجال الكهربي المصاحب لأشعة الليزر. كما أخذ أيضاً عمليات تصادم الكتروني لإثارة جزيئات الغاز المتعادلة بجانب تأينها من المستوى الأرضي والمستويات المثارة. بالإضافة إلى ذلك أخذ النموذج في الاعتبار تأين الجزيئات المثارة بالامتصاص متعدد الفوتونات. أعطت مقارنة نتائج حسابات شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار مع القيم المقاسة عملياً مدى صلاحية النموذج لتفسير ظاهرة انهيار غاز الأكسجين الجزيئي. بينما أعطت مقارنة القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة الالكترونات ومعاملاتها (مثل التكوين الزمني لكثافة الالكترونات,ومتوسط طاقة الإلكترون, ومعدل التأين , ومعدل الإثارة , وكذلك دالة توزيع طاقة الالكترونات) عند القيم المختلفة لضغط الغاز العمليات الفيزيائية المسئولة عن انهيار الغاز لقيمتي الطول الموجي تحت الاختبار.

(6-1) الاستنتاجات *(6-1) Conclusion*

قدمت هذه الدراسة تفسيراً نظرياً للقياسات المعملية التي أجريت بواسطة فوك سنة 2000 لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأكسجين الجزيئي عند مدى من ضغط الغاز يتراوح مابين 190 torr إلى 3000 torr بواسطة مصدر ليزر نيوديميوم ياج والذي يعمل عند الأطوال الموجية 1064 nm و 532 nm بزمن نبضة 5.5 ns. وأضحت نتائج هذه القياسات زيادة شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار الغاز على مدى الضغط تحت الاختبار عند استخدام طول موجي 532 nm . وهو عكس ما توصلت إليه القياسات التي أجريت بواسطة كل من (Davis et al,1999) و (Sercar et al, 1997). وتم تفسير النتائج باستخدام نموذجا عدديا للتدرج الالكتروني وضع سابقا بواسطة ايفانس وجمال وتم تطويره بواسطة جمال وعمر. اعتمد النموذج على الحل العددي لمعادلة بولتزمان المتغيرة مع الزمن متلازمة مع مجموعة من معادلات المعدل التي تصف تغيير كثافة المستويات المثارة. أخذ النموذج في الاعتبار معظم العمليات الفيزيائية المتوقع حدوثها في الحجم البؤري عند تفاعل أشعة الليزر مع الغاز. وأعطت نتائج الحسابات ما يلي:

- أعطت مقارنة القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار والقيم المقاسة عمليا توافقا مناسبا على مدى ضغط الغاز المختبر معمليا مما أكد صلاحية النموذج المستخدم في تفسير القياسات المعملية.
- دلت القيم المرتفعة لشدة الاستضاءة عند المدى المنخفض للضغط على تأثير عملية انسياب الالكترونات خارج حيز التفاعل, أما عند الضغوط المرتفعة فيرجع انخفاض شدة الاستضاءة المحسوبة عند القيمة المقاسة عمليا ربما لعدم الأخذ في الاعتبار عمليات إعادة الاتحاد والتفكك.
- بمقارنة قيم دالة توزيع طاقة الالكترونات المحسوبة عند منتصف زمن النبضة ونهايتها لكل قيمة من قيم ضغط الغاز عند الطوليين الموجيين نجد أن:

قيم الدالة تعاني من انحدار طفيف على مدى طاقة الالكترون, ويزداد الانحدار مع زيادة ضغط الغاز حيث تكون أعلى قيمة للدالة عند طاقة الكترون تساوي 0.0 eV وتنحدر سريعا الى قيم تقل كثيرا عن الواحد الصحيح عند الطول الموجي 532 nm, بينما تتراوح ما بين 10^{10} إلى 10^{6} عند الطول الموجي 1064 nm . ويدل ذلك على الفقد السريع لطاقة الالكترونات نتيجة للتصادم غير المرن المؤدي

إلى فقد كثافة الالكترونات والتي تتطلب بالتالي زيادة شدة استضاءة أشعة الليـــزر اللازمة لانهيار الغاز كما أوضحت القياسات العملية.

- أكدت دراسة التكوين الزمني لكثافة الالكترونات عند القيم المختلفة لضغط الغـــاز الدور الفعال الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني عند الضغوط المنخفضة, وتنـــافس هذه العملية مع عملية التأين بالتصادم الالكتروني عند الضغوط المرتفعـــة خـــلال النصف الأخير من زمن النبضة, حيث تتنافس عمليات التأين مـــع عمليـــات فقـــد الالكترونات.
- أعطت دراسة التغيير الزمني لمتوسط طاقـــة الالكترونـــات اخـــتلاف العمليـــات الفيزيائية المسؤولة عن انهيار الغاز وذلك باختلاف قيمة الضغط عنـــد الطـــولين الموجيين فإن متوسط طاقة الالكترونات تقريبا تظل ثابتة عند قيمة مرتفعة علـــى مدى زمن النبضة. وعند قيم للضغط تساوي وتزيد عن الضـــغط الجـــوي فـــإن التغيير الزمني لها يأخذ شكلاً جاوسياً مع اختلاف القيم لكل من الطولين الموجيين, فعند الطول الموجي الطويل (1064 nm) تتقارب قيم متوسط طاقة الإلكترون من 760 torr إلى 3000 torr . أما عند الطول الموجي 532 nm فنجد أن متوســـط طاقة الإلكترون تنخفض بشكل ملحوظ مع زيادة الضغط مما يدل على فقد طاقـــة الإلكترون وبالتالي الحاجة إلى شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار للتغلب على هـــذا الفقد.
- أوضحت دراسة معدل إثارة وتأين جزيئات الغاز الترابط بين الدور الـــذي تلعبـــه الجزيئات المثارة في نمو كثافة الالكترونات خلال عمليـــة تـــأين فوتـــوني عنـــد الضغوط المنخفضة للغاز وتأين فوتوني وتصادم الكتروني عند الضغوط المرتفعة له. حيث وجد أن قيم كل من معدل الإثارة ومعدل التـــأين عنـــد كـــلا الطـــولين الموجيين تنخفض مع زيادة ضغط الغاز, وتزداد القـــيم انخفاضـــا عنـــد الطـــول الموجي 532 nm مما يؤكد الدور الفعال الذي تلعبه عمليات الفقد وتنافســـها مـــع عمليات زيادة نمو الالكترونات والتي تتطلب زيـــادة شـــدة الاستضـــاءة اللازمـــة لانهيار الغاز.
- أوضحت التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونـــات عنـــد كـــلا الطـــولين الموجيين تغير شكل الدالة خلال نبضة الليزر مما يؤكد أن توزيع الدالـــة لايأخـــذ شكلا ماكسويليا ثابتا بل يتغير مع الزمن, ويظهر ذلك بوضوح عند القيم المرتفعة

لضغط الغاز, بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الدراسة أشارت إلى أنه عند هذه الضغوط تتكون كثافة عاليه من الالكترونات وتختلف فترة تكونها خلال زمن النبضة وفقا لقيمة الضغط, فعند الضغوط المنخفضة تتكون هذه الكثافة في نهاية زمن النبضة, ومع زيادة الضغط تقترب هذه الكثافة من منتصفها. كما أن منطقة الانهيار والتي تتكون عند طاقة إلكترون منخفضة جدا تقترب من الصفر يحيطها مناطق تأين تزداد اتساعا مع انخفاض الغاز. ويزداد تغير شكل الدالة وضوحا عند الطول الموجي 532 nm وبالتالي يختلف توزيع كثافة الالكترونات خلال زمن النبضة وتحديد زمن الانهيار حيث وجد أن الانهيار يحدث في المراحل الأخيرة من زمن النبضة, حيث تتكون منطقة الانهيار عند قيمة منخفضة جدا وتحيطها مناطق تأين ذات الكترونات تحمل طاقة مرتفعة نسبيا. تنحصر مناطق التأين مع زيادة الضغط لتختفي عند الضغوط المرتفعة حيث تتكون بلازما ذات الكترونات لها طاقة متجانسة تقترب من 0.0 eV .

- أوضحت مقارنة تأثير عمليات الكسب والفقد على نمو كثافة الالكترونات أهمية الدور الذي تلعبه كل عملية عند القيم المختلفة لضغط الغاز. حيث أعطت هذه الدراسة تصوراً حقيقياً لما يحدث في ظاهرة انهيار غاز الأكسجين من حيث عمليات التأين الفوتوني للجزيئات المثارة والتي تلعب دوراً هاماً في نمو كثافة الالكترونات عند الطول الموجي 532nm على مدى ضغط الغاز المختبر معملياً مقارنة بعمليات التصادم الالكتروني التي لها التأثير الفعال عند الطول الموجي 1064nm. بالإضافة إلى ذلك أشارت هذه الدراسة إلى الدور الفعال الذي تلعبه عملية فقد الالكترونات بانسيابها إلى خارج حيز التفاعل عند الضغط المنخفض عند الطول الموجي 1064 nm, وعلى عكس من ذلك للطول الموجي 532nm فقد وجد أن تأثير هذه العملية يكون أكثر فاعلية عند الضغط 290 torr, كما وجد لها تأثيراً فعالاً أيضاً عند الضغط 2250 torr. وكذلك نتيجة لالتصاقها مع جزيئات الغاز المتعادلة التي وجد أن لها تأثيراً فعالاً عند الطول الموجي 532nm على مدى ضغط الغاز من 760 torr إلى 3000 torr. وهذا يفسر أيضاً زيادة قيم شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار المناظرة لهذا الطول الموجي مقارنة بقيم الشدة المقاسة للطول الموجي 1064 nm. وربما يعزى ذلك إلى صغر حجم

حزمة الليزر المجمعة في غاز الأكسجين للطول الموجي 532 nm عنه للطـــول الموجي 1064 nm.

Abstract

This work presents a study on the breakdown of molecular oxygen by a Nd: YAG laser source operating at the wavelengths 1064 nm and 532 nm with a pulse duration of 5.5 ns over a gas pressure range varies between 190-3000 torr, to determine the threshold intensity for gas breakdown as a function of both gas pressure, and laser wavelength. More over , this study is also aimed to determine the physical processes responsible for the breakdown phenomenon.

In doing so a numerical model is applied which was previously developed by Evans and Gamal (1980).This model is refined to take into account most of the physical processes which might take place during the interaction between the laser beam and the oxygen molecules (Gamal and Omar, 2001). The computations are devoted to investigate the experimental measurements that was carried out by Phuoc (2000), to study the breakdown phenomenon of oxygen gas as one of the most important constituent of atmospheric air.

The model considers the inverse Bresstrahlung absorption as a process that leads to the gain of energy of free electrons from the electric field associated with the laser beam. In addition, it takes also into account electron collisional processes to excite neutral molecules as well as to ionize ground and excited molecules. Further more, the model considered the photo-ionization of the excited molecules. Comparison between the

calculated thresholds and the measured ones determine the validity of the model in investigating the breakdown of oxygen under the experimental conditions applied in this analysis. While comparison of the calculated Electron Energy Distribution Function (EEDF) and its parameters (i.e. the time evolution of the electron density, the variation of the mean electron energy, the variation of the ionization and excitation rates…etc) at different values of the gas pressure determine the physical processes responsible for gas breakdown. The calculations are carried out at the two values of the laser wavelength on the breakdown of oxygen.

Summary

Intense laser beam lead to optical frequency breakdown of gases .This can produce plasmas with high electron density. The gaseous breakdown induced by intense laser beam has been investigated and applied to the development of laser triggering lightning which is expected to be as a new technique to protect power lines and numerous studies have been reported on this subject. In these studies the efficient production of laser induced plasma is one of the most significant subjects, therefore it is necessary to understand in detail the laser induced breakdown of molecular oxygen as one of the important constituent of air. Although initial research on laser-triggered lightning was started with far infrared lasers, it was found that they are not suitable to initiate lightning. Recent published literature and experimental work favor the use of laser pulses of wavelength range covers near IR to ultraviolet (UV) as an appropriate means for laser-induced lightning discharge

Therefore, in the present study we present an investigation for the breakdown phenomenon of molecular oxygen using laser wavelengths in the range of the electromagnetic spectrum (near IR, and, visible). This investigation is based on a numerical model calculation for the breakdown threshold taken into account all the possible physical processes which might take place during the laser-gas interaction.

The calculations are performed through the modification of previously develop electron cascade model which is based on the numerical solution of the time dependent Boltzmann equation solved for the EEDF as well as a set of rate equations describing the rate of change of excited state population. The model consider the electron energy gain by inverse bremsstrahlung absorption and electron generation through multiphoton ionization and collision ionization of the formed excited states. Loss processes which either deplete the number of generated electrons or their energies are also considered in this analysis. For a realistic result of the computation considered the exact correlation between the electron energy and cross section and rate coefficient for each physical process encountered in this model . The equations are solved numerically using a finite difference technique for the first and second derivatives while the linear part of the equation is solved by step to step integration.

In doing so two lengths of the time step are used in the calculations. The shorter time step is used when the elastic and energy gain term is considered while the longer one is applied for the calculations of the inelastic collisional terms. In this calculations we assumed that the interaction starts with one electron present at the focal volume, this electron has a Gaussian distribution with its peak energy located at 4 eV.

The computer program was run to investigate the experimental result of oxygen irradiated with the first two harmonics of Nd: YAG laser radiation at wavelengths 1 064 nm, 532 nm, with pulse duration 5.5 ns. The peak intensity associated with these experiments were in the range 10^{12} W/cm^2 to 10^{14} W/cm^2. These are the experimental conditions of Phuoc (2000). The output of the computer program revealed relations between the threshold intensity as a function of gas pressure at the two laser wavelengths. Good agreement was obtained between the calculated thresholds and the experimentally measured ones at the two laser wavelengths over the pressure range examined experimentally. It has been noticed from these results that experimental and calculated values of the threshold intensity at the shorter wavelength lie above those obtained at the longer one. This agrees with the measurements which validate the model for investigating the experimental study on laser induced oxygen breakdown.

Therefore, it was necessary to study the physical processes responsible for the breakdown of oxygen at each laser wavelength. In doing so , the EEDF and its parameter are calculated at different values of the gas pressure and compared for the two laser wavelengths. The results of this study showed that at the low pressure regime ionization are mainly proceeds via multi photon ionization processes. This process is more effective at the shorter wavelength. At the higher pressures ,however, the distribution function calculated at the end of the laser pulses clarified the important role played by the loss processes which deplet the highly electron energies leaving most of them at the low energy region. Moreover a study of the time evolution of the electron density confirmed this result and showed that growth of the electron density at the low pressures is an evidence for the effective contribution of the multi photon ionization process. On the contrary the slow growth rate of the

electrons during the early stages of the laser pulse for the high pressure region confirm the importance of the electron collision process in the breakdown of gas. These results are confirmed from the study of time evolution of the excited states, the excitation and ionization rates as well as the electron mean energy at each value of the gas pressure for the two laser wavelengths. Similar behavior is observed for these parameters at the two laser wavelengths but with different values. On the other hand the study of the time evolution of the EEDF at the different values of gas pressure showed the exact time at which breakdown occurs and the energy region over which the newly electrons are generated.

Moreover, the calculation of the time evolution of the electron density in the absence of each of the ionizing processes (viz ,multi photon ionization of the excited states, collisional ionization of ground and excited molecules) showed that multiphoton ionization of the excited states represents the main source for the newly born electrons which contribute to the breakdown phenomenon for the two laser wavelengths. This result confirmed the relation which represents the ionization rate as a function of time as well as the time evolution of the electron mean energy for the two laser wavelengths over the gas pressure range examined experimentally. The contribution of collisional processes is found to be more effective at the longer wavelength (1064 nm).

In order to test the source of this obtained high values of the calculated threshold intensity at laser wavelength 532 nm calculations are carried out neglecting the separate contribution of each of the loss processes considered in the model namely vibrational losses ,attachments and electron diffusion. These studied gave the exact contribution of each of these processes to the breakdown of oxygen for the different pressure values at the two laser wavelengths. These results showed that loss

processes are more effective at the shorter wavelength. This may explain the high threshold values corresponding to this wavelength. This analysis indicates the important role played by loss processes in the breakdown phenomenon of this gas.