تفسير نظري لديناميكية انتشار نبضات من أشعة الليزر في غاز الأرجون : دراسة تأثير الضغط

إعداد المعيدة
هيفاء محمد عبد الله العبدلي الغامدي
بكالوريوس فيزياء

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

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

كلية العلوم
جامعة الملك عبد العزيز
جدة – المملكة العربية السعودية
ربيع الأول 1431هـ– Mars 2010G **(1431/3/27هـ)**

Theoretical investigation of laser pulses propagation dynamic in argon gas : Pressure effect study

By(Haifa Mohammed Abdullah AL-Ghamdi)

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
Rabi' al-awwal 1431 H -Mars 2010G (13/3/2010 G)

قائمة المحتويات

نموذج إجازة الرسالة

الإهداء..... ج

شكر وتقدير..... د

المستخلص..... و

قائمة المحتويات..... ي

قائمة الأشكال..... س

قائمة الجداول..... ق

قائمة الرموز و المصطلحات..... ر

الفصل الأول : مقدمة و مسح مرجعي **1**

(1-1) مقدمة 1

(1-2)مسح مرجعي..... 3

(1-2-1) آلية الانهيار..... 6

(1-2-1-أ) قياسات معملية ودراسات نظرية عن تأين الوسط بواسطة عملية الامتصاص المتعدد للفوتونات 7

(1-2-1- ب) دراسات عملية و نظرية عن تأين الوسط خلال العملية العكسية لبرمشتراهلنج 12

(1 -3) شرط الانهيار 21

(1-4)تطبيقات عن ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر 24

(1 5) الهدف من الدراسة 27

الفصل الثاني: الترابط بين خصائص أشعة الليزر اللازمة لانهيار الوسط والعمليات الفيزيائية المؤدية للتأين 30

(2-1) مقدمة..... 30

(2-2) شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تحت التأثير المفرد لعملية الامتصاص المتعدد للفوتونات 31

(2-3) شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تحت التأثير المفرد لعملية التأين التدريجي 35

(2-3-أ) العلاقة بين شدة استضاءة أشعة الليزر ومعدل التأين بالتصادم 38

(2-4) تحكم عمليات فقد الالكترونات في ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر 40

(2-5) معادلة الاستمرارية لمعدل تغير كثافة الالكترونات نتيجة لعمليات النمو والفقد 43

(2-5-أ) شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تحت التأثير المباشر لعملية الانسياب 44

(2-5-ب) شدة استضاءة أشعة الليزر اللازمة للانهيار تحت تأثير عملية إعادة الاتحاد 47

الفصل الثالث :دراسة شاملة عن نمذجة ظاهرة الانهيار في الأوساط الغازية المستحث بواسطة أشعة الليزر..... 50

(3-1) مقدمة 50

(3-2) نماذج عددية لتفسير ظاهرة انهيار الغازات المستحث بواسطة أشعة الليزر. 50

(3-2-1) نموذج زيلدووفتش وريزر..... 51

(3-2-2) نموذج شان ومودي 55

(3-2-3) نموذج فريد لاند 58

(3-2-4) نموذج سنتياجو و روبنسون 63

(3-2-5) نموذج ايفانز وجمال 65

(3-2-6) نموذج ويل وروزن 69

(3-2-7) نموذج تاكاهاشي و نيشي جيما 72

الفصل الرابع: دراسة وتطوير النموذج المطبق للتدرج الالكتروني..... 76

(4-1) وصف نموذج التدرج الالكتروني..... 77

(4-2) المفهوم الفيزيائي للنموذج 79

(4-3) حدود كسب وفقد الالكترونات نتيجة للعمليات الفيزيائية المختلفة..... 82

(4-4) حدود كسب وفقد الذرات المثارة 85

(4-5) المعادلات الأساسية للنموذج 86

(4-5-1) دالة توزيع طاقة الالكترونات..... 86

(4-5-2) كثافة المستويات المثارة 88

(4-6) طريقة الحساب..... 89

(4-6-1) طريقة معالجة الحدود المسئولة عن الإثارة والتأين وفقد الالكترونات 92

(4-7) مساحات المقطع ومعاملات معدلات العمليات الفيزيائية..... 94

الفصل الخامس: نتائج الحسابات ومناقشتها 102

(5-1) مقدمة 102

(5-2) دراسة ظاهرة الانهيار باعتبار التغير الزمني لشدة استضاءة أشعة الليزر 103

(5-2-1) مقارنة بين القيم المحسوبة و المقاسة عملياً 103

(5-2-2) دالة توزيع طاقة الإلكترونات 105

(5-2-3) التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات 108

(5-2-4) التكوين الزمني لكثافة المستويات المثارة 110

(5-2-5) التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون 112

(5-2-6) التغير الزمني لمعدل الإثارة 114

(5-2-7) التغير الزمني لمعدل التأين 114

(5-2-8) التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الإلكترون 117

(5-3) تأثير عمليات نمو كثافة الإلكترونات 118

(5-4) عمليات فقد الإلكترونات 134

(5-4-1) تأثير عمليات الفقد على شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار 134

(5-4-2) تأثير عمليات الفقد على التغير الزمني لكثافة الإلكترونات 136

(5-5)دراسة ظاهرة الانهيار باعتبار التغير الزمني و البعدي لشدة استضاءة أشعة الليزر.. 141

(5-5-1) دراسة انتشار البلازما على امتداد المسافة المحورية تحت تأثير طاقة أشعة الليزر. 146

(5-5-2) دراسة انتشار البلازما على امتداد المسافة المحورية تحت تأثير ضغط الغاز 156

الفصل السادس: الخلاصة ونظرة مستقبلية 167

قائمة المراجع..... 173

الملاحق 184

ملخص الرسالة باللغة الإنجليزية ..... a

المستخلص

يقدم هذا البحث دراسة نظرية لظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر و تولد البلازما في الأرجون عند قيم مختلفة لضغط الغاز . تم الحصول على الانهيار باستخدام حزمة مجمعة من أشعة الليزر ذات شدة استضاءة عالية بطول موجي 532 nm و زمن نبضة 8.0 ns وطاقة عظمى تصل إلى 500 mJ لتشعيع غاز الأرجون على مدى من ضغط الغـــاز يتراوح مـــا بيـــنtorr (760-10) والتي تعـــادل من 0.013 إلى 1 ضغط جـــوي (Bindhu et al ,2003). لعمل ذلك طُبق نموذجا مطوراً للتدرج الإلكتروني (Gamal et al,1999) يعتمد على الحل العددي لمعادلة بولتزمان المتغيرة مع الزمن متلازماً مع مجموعة من معـــادلات المعدل التي تصف معدل تغير كثافة المستويات المثارة المتكونة.و بفرض أن شدة الاستضاءة تأخذ شكلاً جاوسياً كدالة في الزمن فقط ,أعطت مقارنة قيم الحسابات لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في ضغط الغـــاز و القيم المقاسة عملياً توافقاً جيداً على مدى ضغط الغاز . وهذا بالتالي أكّد صلاحية النموذج العددي لتفسير ظاهرة انهيار غاز الأرجون . بالإضافة إلى ذلك أوضحت دراسة تغير دالة توزيع طاقة الإلكترونات ومعاملاتها خلال زمن النبضة كدالة في ضغط الغاز الترابط بين العمليات الفيزيائية المسئولة عن انهيار الغاز وضغطه . كما أخذت الدراسة في الاعتبار تأثير عمليات كسب وفقد الإلكترونات عند القيم المختلفة لضغط الغاز .ولدراسة انتشار البلازما في الحجم البؤري اخذ النموذج في الاعتبار التغير الزمني والبعدي لشدة الاستضاءة في حيز التفاعل حيث أجريت الحسابات عند قيم مختلفة لطاقة أشعة الليزر لتوضيح العلاقة بين كثافة البلازما المتكونة و معدل امتصاصها للطاقة الساقطة وكذلك معدل انتشارها في الحجم البؤري كدالة في طاقة الليزر . أشارت نتائج هذه الدراسة إلى زيادة معدل انتشار البلازما في الحجم البؤري بزيادة طاقة أشعة

الليزر الساقطة , حيث وُجد أنه عند طاقة ساقطة تصل إلى ثلاثة أمثال ونصف من قيمة الطاقة اللازمة للانهيار فإن البلازما المتكونة تنتشر لتغطي طول رايلي في اتجاه حزمة الليزر . من جهة أخرى أوضحت دراسة تأثير ضغط الغاز على انتشار البلازما في الحجم البؤري لقيم من ضغط الغاز تساوي 1, 10 ,100 ضغط جوي أن أكثر معدل انتشار للبلازما يقع عند الضغوط ا

الخلاصة ونظرة مستقبلية
Conclusion and Future Work

قدم هذا البحث دراسة عددية عن ظاهرة انهيار غاز الأرجون بواسطة أشعة ليزر النيودميوم ياج و الذي يعمل عند التوافقية الثانية له بطول موجي 532 nm و زمن نبضة 8 ns و طاقة تعمل في مدى من 20-500 mj . وذلك لدراسة العليات الفيزيائية المسئولة عن ظاهرة الانهيار و تكوّن البلازما في الحجم البؤري كدالة في ضغط الغاز ز واتجهت هذه الدراسة لتفسير ظاهرة انتشار البلازما و التي شوهدت عملياً بواسطة بندهو ومجموعته (Bindhu et al ,2003) .

أخذت هذه الدراسة مدخلين مختلفين من حيث معالجة تغير شدة الاستضاءة في الحجم البؤري , أحدهما التغير الزمني لشدة استضاءة أشعة الليزر و الذي فُرض بشكل جاوسي, وذلك لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار غاز الأرجون كدالة في الضغط . و تحديد العمليات الفيزيائية المسئولة عن انهيار الغاز و تكوّن البلازما عند القيم المختلفة لضغط الغاز و المختبرة معملياً . أما الآخر فقد فرض أن شدة استضاءة أشعة الليزر تتغير زمنياً و بعدياً في الحجم البؤري و تأخذ أيضاً شكلاً جاوسياً في كل من الزمن والمسافة المحورية و التي تتغير معها المسافة القطرية للحجم البؤري . تؤدي هذه الدراسة إلى إمكانية تفسير القياسات المعملية لميكانيكية انتشار البلازما في الحجم البؤري و ذلك تحت تأثير كلاً من طاقة أشعة الليزر الساقطة عند قيمة ثابتة لضغط الغاز (الضغط الجوي) و عند قيم مختلفة لضغط الغاز تصل إلى 100 ضغط جوي و قيمة ثابتة لطاقة أشعة الليزر .

أسفرت هذه الدراسة عن ما يأتي :

أولاً : نتائج التأثير المفرد للتغير الزمني لشدة استضاءة أشعة الليزر على ظاهرة الانهيار

- بالأخذ في الاعتبار فقط التغير الزمني لشدة الاستضاءة أعطت مقارنة القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار و القيم المقاسة عملياً توافقاً مناسباً على مدى ضغط الغاز المختبر معملياً . أشار ذلك إلى أن الانهيار يُحكم بواسطة عمليات تصادمية يزداد معدلها مع زيادة ضغط الغاز مما يؤدي إلى انخفاض شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وهذا يفسر القياسات المعملية لطاقة أشعة الليزر اللازمة لانهيار الأرجون كدالة في ضغط الغاز و التي أجريت بواسطة بندهو ومجموعته عام 2003 . كما أكّد ذلك صلاحية النموذج لتفسير ظاهرة انهيار غاز الأرجون تحت الشروط المعملية التي أعطيت بواسطة بندهو ومجموعته .
- أوضحت دراسة دالة توزيع طاقة الإلكترونات عند القيم المختلفة لضغط الغاز تزايد قيم دالة التوزيع بزيادة ضغط الغاز مع ملاحظة الانحدار السريع في قيم الدالة عند طاقة إلكترون تعادل طاقة إثارة المستوى الأول للذرة . ويشير ذلك إلى فقد طاقة الإلكترونات خلال عمليات تصادم غير مرنة تزداد بزيادة ضغط الغاز . و عند القيمة المنخفضة لضغط الغاز (10 torr) تعاني دالة التوزيع من انحدار سريع منذ القيم المنخفضة لطاقة الإلكترون و التي تشير إلى زيادة معدل فقد الإلكترونات نتيجة لعملية الانسياب .
- كما أوضحت دراسة التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات القيم المنخفضة للكثافة خلال المراحل الأولى لزمن النبضة و التي تتزايد مع انخفاض الضغط , مما يدل على زيادة معدل التأين بالامتصاص الفوتوني عند هذه القيم المنخفضة لضغط الغاز و التي يتناقص معدلها مع زيادة الضغط لتحل محلها عمليات تأين بالتصادم الإلكتروني . ويتزايد معدل هذه العملية الأخيرة مع زيادة ضغط الغاز و خاصة حول منتصف زمن نبضة الليزر كما أشارت هذه النتائج أيضاً إلى التنافس بين عمليات الفقد و الكسب للإلكترونات خلال النصف الأخير من زمن النبضة .

- ارتبطت هذه النتائج مع القيم المحسوبة للتكوين الزمني بكثافة المستويات المثارة عند نفس قيم ضغط الغاز حيث أشارت هذه العلاقة إلى زيادة معدل كثافة المستويات المثارة بزيادة ضغط الغاز و التي بدورها تساهم في زيادة كثافة الإلكترونات خلال عمليات تأين فوتوني و تصادم إلكتروني بإلكترونات ذات طاقة منخفضة .
- أوضحت العلاقة التي تعطي التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون أن العمليات الفيزيائية المسئولة عن تأين الغاز تختلف باختلاف الضغط , حيث يتشابه التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون على مدى الضغط المنخفض من 10 torr إلى 210 torr , أما عند القيم المرتفعة لضغط الغاز 550 torr و 760 torr فنجد أن التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون يسلك سلوكاً مختلفاً . فبينما يزداد متوسط طاقة الإلكترون خلال النصف الأخير من زمن النبضة عند الضغوط المنخفضة تتناقص قيمته خلال نفس الفترة على المدى المرتفع لضغط الغاز .
- تأكيداً لهذه الدراسة أعطى التغير الزمني لكلٍ من معدل الإثارة ومعدل التأين دليلاً لاختلاف العمليات الفيزيائية المسئولة عن التأين باختلاف ضغط الغاز , حيث وُجد أنه عند القيم المنخفضة للضغط تلعب عملية التأين الفوتوني دوراً هاماً في زيادة كثافة الإلكترونات نتيجة لتأين المستويات المثارة و التي يزداد معدل نموها بزيادة ضغط الغاز . أما عند المدى المرتفع لضغط الغاز فإن التأين يتم خلال كلاً من التصادم الإلكتروني و الامتصاص الفوتوني للمستويات المثارة للذرة , مما يؤكد انخفاض متوسط طاقة الإلكترون خلال النصف الأخير من نبضة الليزر .
- أعطت دراسة التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الإلكترونات برهاناً على أن نمو دالة التوزيع خلال نبضة الليزر يتبع التغير الجاوسي لشدة الاستضاءة و يظهر ذلك بشكل واضح عند القيم المنخفضة لضغط الغاز . أما عند الضغوط المرتفعة فنجد أن قيم دالة التوزيع تنطبق تماماً خلال النصف الأخير من زمن النبضة , وهذا بالتالي يؤدي إلى تغير شكل البلازما المتكونة و التي أوضحتها الأشكال ثلاثية الأبعاد حيث تبدأ البلازما في التكوّن خلال النصف الأخير من زمن النبضة عند الضغوط المرتفعة بينما تكون عند نهاية النبضة فقط عند الضغوط المنخفضة .

- أكّدت دراسة تأثير عمليات نمو كثافة الإلكترونات على أهمية الدور الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني للمستويات المثارة عند المدى المنخفض لضغط الغاز و عملية التأين بالتصادم الإلكتروني لكلٍ من المستوى الأرضي و المستويات المثارة , بجانب عملية التأين الفوتوني للمستويات المثارة على المدى المرتفع لضغط الغاز .
- أشارت دراسة عملية فقد الإلكترونات إلى الدور الهام الذي تلعبه عملية الانسياب في نمو كثافة الإلكترونات عند المدى المنخفض لضغط الغاز , أما عند القيم المرتفعة للضغط فوُجد أن عملية إعادة الاتحاد بين إلكترونين و أيون موجب تعمل على زيادة كثافة مستوى الإثارة العلوي و التي بدورها تتأين خلال تصادم إلكتروني أو امتصاص فوتوني لتنافس فقد الإلكترونات نتيجة لعملية إعادة الاتحاد أو زيادة كثافتها عندما تتخطى معدل تكوّن الذرات المتعادلة في المستوى المثار معدل فقد الإلكترونات بإعادة الاتحاد , أي أن هذه العملية تصبح عملية كسب و ليست فقد للإلكترونات .

ثانياً : نتائج تأثير التغير الزمني والبعدي لشدة استضاءة أشعة الليزر على البلازما المتكونة في الحجم البؤري

أعطى التغير الزمني و البعدي لشدة الاستضاءة ذات الشكل الجاوسي حجماً بؤرياً يتغير في القطر مع المسافة المحورية . ووفقاً لنتائج القياسات المعملية التي أجريت بواسطة بندهو و مجموعته لتغير طاقة أشعة الليزر مع ضغط الغاز, وُجد أن انهيار غاز الأرجون يحدث بقيم منخفضة نسبياً لطاقة أشعة الليزر عند ضغط غاز يزيد عن 500 torr , حيث تتكون البلازما و تؤدي إلى امتصاص ملحوظ لطاقة الليزر , ومع زيادة ضغط الغاز على الضغط الجوي يحدث تغير طفيف في معدل امتصاص هذه الطاقة . وأعزي ذلك إلى استهلاك جزء من الطاقة في تمدد البلازما المتكونة في منطقة الانهيار , وبزيادة الطاقة الساقطة يزداد معدل الامتصاص .

- أعطت دراسة تغير القيمة العظمى لشدة الاستضاءة على امتداد المسافة المحورية و القيم المناظرة لها من كثافة الإلكترونات عند قيم مختلفة من طاقة أشعة الليزر الساقطة تغير موضع تكوّن البلازما مع الطاقة , بالإضافة إلى أن هناك قيمة حرجة

للطاقة عندها يحدث الانهيار , ومع زيادة طاقة أشعة الليزر يحدث الانهيار قبل مركز الحجم البؤري في اتجاه حزمة الليزر , مما يؤدي إلى زيادة طول البلازما المتكونة . و أثبت ذلك مقارنة القياسات العملية للانبعاث الطيفي من منطقة البلازما و كثافة البلازما المحسوبة و الممثلة في أشكال ثلاثية البعد .

- أوضحت دراسة انهيار الغاز و تكوّن البلازما عند القيم المرتفعة لضغط الغاز زيادة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار عند قيم لضغط الغاز تزيد عن 10 ضغط جوي (10000 torr) .
- أشارت دراسة تغير عدد الإلكترونات في الحجم البؤري على امتداد المسافة المحورية تغير طول البلازما المتكونة مع ضغط الغاز , حيث تبدأ صغيرة عند الضغط الجوي ليتزايد طولها مع زيادة الضغط إلى 10 ضغط جوي ثم يتناقص مرة أخرى عند 100 ضغط جوي , أعزي ذلك إلى زيادة معدل عمليات فقد الإلكترونات و التي تؤدي إلى اضمحلال البلازما خلال عملية إعادة الاتحاد , ومع زيادة قدرة الليزر وُجد أن طول البلازما لا يتأثر بتغير ضغط الغاز .
- أعطت دراسة التكوين الزمني لعدد الإلكترونات في الحجم البؤري كدالة في المسافة المحورية الفترة الزمنية التي تتكون فيها البلازما و التي وُجد أنها تختلف باختلاف ضغط الغاز و كذلك قدرة الليزر .

لمتوسطة .

Abstract

This research presents a theoretical study of the phenomenon of laser induced breakdown and plasma generation in argon at different values of the gas pressure .The breakdown is obtained using a focused high intensity laser beam of wavelength 532 nm , pulse duration 8 ns and maximum energy 500 mJ , to irradiate the argon gas over a pressure

range varies between 10-760 torr, which is equivalent to 0.013-1.0 atm (Bindhu et al ; 2003). In doing so a modified electron cascade model (Gamal et al , 1999) in applied which depends on the numerical solution of the time dependent Boltzmann equation simultaneously with a set of rate equations that describe the rate of change of the formed excited states density. Assuming the intensity has a Gaussian shape that varies only in time, comparison of the calculated threshold intensity as a function of the gas pressure and the experimentally measured ones showed good agreement over the whole pressure range. This in turn validate the numerical model in investigating the breakdown phenomenon of argon. In addition the study of the variation of the electron energy distribution function(EEDF) and its parameters during the laser pulse as a function of the gas pressure demonstrated the correlation between the physical processes responsible for the gas breakdown and the gas pressure. The study takes also into account the effect of electron gain and loss processes at the different gas pressure values. To study the plasma propagation in the focal volume the model considered the temporal and spatial variation of the laser intensity in the focal volume, where the calculations are carried out at different values of the laser energy to clarify the relation between the density of the formed plasma and its rate of absorption for the input energy as well as its propagation rate in the focal volume as a function of the laser energy. The result of this study illustrated the increase rate of plasma propagation by increasing the input energy, where it is found that at input energy equals three and half time its threshold energy value ,the plasma propagates to cover the whole Rayleigh range in the backward direction. On the other hand, the study of the effect of gas pressure on the plasma propagation in the focal volume for gas pressure of 1.0, 10.0 and 100.0 atm showed that the most interesting

propagation of the plasma occurs at the intermediate region of the gas pressure.

Summary

The phenomenon of laser induced breakdown and plasma generation in gases have been studied extensively both experimentally and theoretically during the last five decades. Recently ,this phenomenon found a great importance for various applications, which include micro industries in electronics that use the plasma etching technique in the integrated circuits as well as in the environmental application for the measurement of pollution in air, water and soil and surface cleaning, in addition to its wide application in medicine and biology. The studies showed that these applications are mainly depend on the plasma formed in the breakdown region. The nature of the plasma is found to vary according to the laser characteristics and the type of the medium.

One of the main features of the formed plasma is its propagation in the backward direction in the focal volume as the input laser energy exceeds the threshold energy for breakdown. Moreover as the gas pressure increases the rate of propagation increases and more absorption of the input energy occurs in the plasma causing less transmission in the forward direction. Therefore more interest is devoted to study the physical processes responsible for this propagation (Bindhu et al ,2003: Tsuda et al,1996;yamada et al, 1985;Yamada et al,1990;Mlejnek et al,1998). In these studies it was found that the physical processes which are associated with the interaction of the laser radiation with the gaseous targets depend on the parameters of the laser source as well as the nature of the irradiated gas.

Accordingly in this study we present an investigation to examine the breakdown of argon at pressures cover a range of 10-760 torr irradiated with the second harmonic of a Nd:YAG laser source operating at 532 nm with FWHM of 8 ns and maximum input energy of 500 mJ.

This gas has been chosen since it has examined experimentally by various authors see for example Bindhu et al ,2003: Tsuda et al,1996;yamada et al, 1985;Yamada et al,1990;Mlejnek et al,1998). Moreover this gas showed a minimum Ramsuer, in the relation between the momentum transfer collision cross-section and the electron energy. This minimum might has a noticeable effect on rate of energy gain by electrons from the laser field during the Inverse Bremsstrahlung absorption process which plays an important role in the breakdown of argon.

The calculations involved the breakdown threshold as a function of the gas pressure taking into account all the possible physical processes which might take place during the laser gas interaction.

In doing so , a modified electron cascade model given previously by Gamal et al (1999)is applied to investigate the breakdown of argon under the experimental conditions of Bindhu et al (2003).The model based on the numerical solution of the time dependent of the Boltzmann equation solved for the EEDF and a set of rate equations that describe the rate of change of the formed excited states population. The model considered the gain of energy by electrons through the inverse Bremsstrahlung absorption process followed by collisional ionization of gas atoms. In addition to that electrons may also be generated through multi-photon ionization of the excited states. Loss processes which might either deplete the density of the generated electrons or their energies are also considered in this analysis.

For realistic results the computation cared for the exact correlation between the electron energy and cross-sections or rate coefficients of 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 elastic collision takes place for the energy gain and loss terms, while the longer one is considered at the calculations of the inelastic collisional terms. In these calculations it is assumed that the interaction starts with one electron present at the focal volume before laser sets on. For continuation of the EEDF this electron is assumed to have a Gaussian distribution with its peak energy located at 4 eV (which equals about one fourth of the ionization potential of the gas).

The computer program was run under the experimental conditions of Bindhu et al (2003) to investigate threshold intensity of argon as a function of the gas pressure. These values are then compared with the experimentally measured ones. Agreement is obtained between the calculated and measured thresholds over the whole pressure range. This comparison assured the validity of the model to investigate the tested measurements.

To give a deep understanding of the exact contribution of the physical processes responsible for the breakdown phenomenon as a function of gas pressure, calculation of the electron energy distribution function EEDF and its parameters (e.g. the Temporal variation of; electron density, ionization rate, electron mean energy …etc) are carried out at each values of the gas pressure.

This study indicated that ionization processes that lead to gas breakdown depend on photo-ionization at pressures less than100 torr,

while at higher pressures collisional processes are dominant. This was confirmed by the relation obtained for the time evolution of the electron density ,excited states density, ionization rate , excitation rate ,electron mean energy and EEDF.

To get a deeper insight into the important role played by ionization processes as well as loss processes during the laser pulse a study was carried out for the temporal variation of the electron density at each value of the gas pressure in the presence and absence of each process. This showed that at higher pressures >100 torr the electron density gradually increases. This assures that ionization proceeds with a high rate via collisional processes which act side by side with multi-photon ionization of the formed excited states. Recombination losses act to form neutral atoms at the highly excited states ,this in turn leads to fast ionization of these states. Thus, this process operates as a gain process rather than loss process. At the lower pressures the ionization rate is found to be very fast during the early stages of the laser pulse ,this confirms the domination of the MPI process on this pressure regime. In addition , electron diffusion, is found to be effective, since the early stages of the laser pulse at this pressure.

To study the effect of gas pressure on the plasma propagation in the focal volume ,calculations are carried out to find out first a relation between the threshold intensity and gas pressure covering a range 1-100 atm. This relation showed an observable increase in the threshold intensity at the highest pressure value. This was attributed to the effect of loss processes as well as the nonlinear physical processes which are ignored in the applied model. Moreover, the calculation of the electron density at the end of the laser pulse as a function of the axial distance z_R at two values of input laser powers namely 7 and 20 MW for each value of the gas

pressure .These input powers are chosen deliberately since they correspond to the values experimentally tested by Bindhu et al (2003). This results showed that as the gas pressure increases from 1.0 atm to 10 atm the plasma length increases by a factor of 3.5.While further increasing the gas pressure up to 100 atm showed a noticeable decrease of the plasma length. This was attributed to the effect of the high rate of loss processes at this pressure value which might explain the observed increase of the threshold intensity at this pressure. To confirm this result relations are obtained for the time evolution of the electron density at different axial positions for each the two input laser powers for the considered gas pressure values. This relations showed that at the low input power the growth rate of electrons showed different behaviors for the different pressure values. At the higher input power ,however, the growth rate of electrons along the axial distance showed a similar behavior over the whole pressure range and along the axial distance.