

استخدام الليزر النبضي عالي الطاقة Nd:YAG في توليد البلازما لمادة التوتياء (الهدف) ودراسة أطيافها

الدكتور أنور الدويري*

(تاريخ الإيداع 18 / 6 / 2007. قُبِلَ للنشر في 24/10/2007)

□ الملخص □

يدرس هذا البحث ظاهرة توليد البلازما الساخنة، نتيجة تفاعل شعاع الليزر عالي الطاقة مع عينات صلبة (الهدف)، والأطياف المتولدة عنها.

في البداية، تمَّ تحديد جميع وسطاء الليزر النبضي عالي الطاقة Nd:YAG المستخدم في الدراسة، وآلية الحصول على البلازما الساخنة باستخدام الليزر النبضي في المختبر، ومن ثمَّ دراسة الخطوط الطيفية للبلازما المتولدة بتغيير الوسط الغازي (النيون Ne، النتروجين N_2 ، الأرجون Ar) المحيط بمادة الهدف، وتحديد ثوابت الانزياح $\Delta\lambda$ للخطوط الطيفية الناتجة. ومن ثمَّ دراسة الخطوط الطيفية بتغير كثافة الطاقة الإشعاعية $W(MW.cm^{-2})$ للنبضة الليزرية المستخدمة، وعلاقة ذلك بدرجة الحرارة المطلقة T للبلازما.

ومن خلال نتائج هذه الدراسة، تمَّ تعيين وسطاء التعرض (w) والانزياح $\Delta\lambda$ للخطوط الطيفية، وتركيز الإلكترونات N_e في البلازما. إن تركيز الإلكترونات ودرجة حرارة البلازما المتولدة بواسطة شعاع الليزر أعلى بكثير من تركيز الإلكترونات ودرجة حرارة البلازما المتولدة بالانفراغ الكهربائي، لذلك يعدّ الليزر مصدراً مفضلاً لدراسة أطياف المادة.

كلمات مفتاحية: الليزر - البلازما - الطيف - التوتياء.

* أستاذ في قسم الفيزياء بكلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Using High Pulsing Laser Nd:YAG to Generate Plasma for Zinc Material (object) and Study Its Spectrums

Dr. Anwar Al-Doiari *

(Received 18 / 6 / 2007. Accepted 24/10/2007)

□ ABSTRACT □

This paper discusses the phenomenon of generating hot plasma, the interaction of laser ray with a solid material (object) and its generating spectrums. At the beginning, all parameters of high pulsing energy laser Nd:YAG which are used in this study have been determined. It also determines obtaining the hot plasma using pulsing laser in laboratory, and then studies spectrum lines generated of plasma by changing gas atmosphere (Neon, Nitrogen, Argon) around with zinc material. It also defines the generate shifting spectrum lines constant. The paper then studies spectrum lines by variation density radiant energy of using pulsing laser, and the relation that by temperature of plasma.

As the result of this study, the parameters widening and shifting of spectrum liens and the concentration of electrons in plasma had been calculated. The concentration of electrons and temperature of plasma is higher than the generated by the electrical discharge, so laser is a very powerful source and important to study material spectrums.

Keywords: Laser, Plasma, Spectrum, Zinc.

*Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

I- مقدمة:

دخلت أشعة الليزر في العديد من المنتجات التكنولوجية لما لهذه الأشعة من خصائص فيزيائية تتميز بها عن غيرها من الأشعة الكهرومغناطيسية، نذكر منها أحادية اللون monochromatic، والترابط coherent والاتجاهية الواحدة directional. لذلك أصبحت أشعة الليزر عنصراً أساسياً في أجهزة تشغيل الأقراص المدمجة، أو في آلات طبيب الأسنان، أو في معدات قطع ولحام الحديد، أو في أدوات القياس وغيرها من المجالات. كما أن الشدة العالية لشعاع الليزر، جعلت من الممكن توليد البلازما الساخنة في المختبر.

البلازما: هي الحالة الرابعة للمادة، وتختلف في طبيعتها عن حالات المادة الثلاث (الغازية، السائلة، الصلبة) في أن الإلكترونات تكون منفصلة تماماً عن أنويتها، وبذلك يتضح لنا أنها مزيج من الشحنات الموجبة والشحنات السالبة، وعلى الرغم من نسبتها القليلة على الأرض إلا أن معظم الكون (99%) هو في حالة بلازما، علماً بأن استخداماتها كثيرة في مجال الصناعات الإلكترونية، وفي مصابيح النيون الموجودة في المنازل وغيرها. والبلازما بشكل عام مزيج غازي يتكون من أعداد متساوية من الأيونات موجبة الشحنة والإلكترونات السالبة، ومن ثم فهي حالة غير مستقرة للمادة، لذلك فإن قوة التجاذب الكهربائية تعمل على إعادة اتحاد الشحنات الموجبة والسالبة بعضها ببعض، وتكون نتيجة إعادة الاتحاد هي انطلاق ضوء ذي تردد معين (طيف) يعتمد على سويات الطاقة للذرات المكونة لمادة البلازما. وتعتبر البلازما المتولدة بواسطة أشعة الليزر مصدراً مفضلاً لدراسة الأطياف مقارنة مع البلازما الناتجة بالانفراغ الكهربائي للسببين التاليين:

- إن درجة حرارة البلازما الناتجة بواسطة شعاع الليزر أعلى بكثير من درجة حرارة البلازما الناتجة بالانفراغ الكهربائي، لذلك فإن البلازما ذات درجات الحرارة العالية تعدّ أفضل لإصدار الخطوط الطيفية.
- إن تركيز الإلكترونات في البلازما الناتجة بواسطة شعاع الليزر أكبر بكثير من تركيز الإلكترونات في البلازما الناتجة بالانفراغ الكهربائي.

I-1- أهمية البحث وأهدافه:

تكمُن أهمية البحث في استخدام أجهزة قياس متطورة وذات تقنية عالية، لدراسة أطياف البلازما الناتجة عن مواد صلبة في أجواء غازية مختلفة، ولتعرف بعض الخواص الفيزيائية الجديدة لهذه المواد. ويهدف البحث إلى ما يلي:

- تحديد جميع وسطاء الليزر النبضي عالي الطاقة Nd:YAG المستخدم في الدراسة.
- آلية الحصول على البلازما باستخدام الليزر النبضي في المختبر.
- دراسة الخطوط الطيفية للبلازما بتغير الوسط الغازي المحيط بمادة الهدف.
- دراسة الخطوط الطيفية للبلازما الناتجة بتغير كثافة الطاقة الإشعاعية للنبضة الليزرية المستخدمة.
- حساب وسطاء التعرض والانزياح للخطوط الطيفية وتركيز الإلكترونات في البلازما.

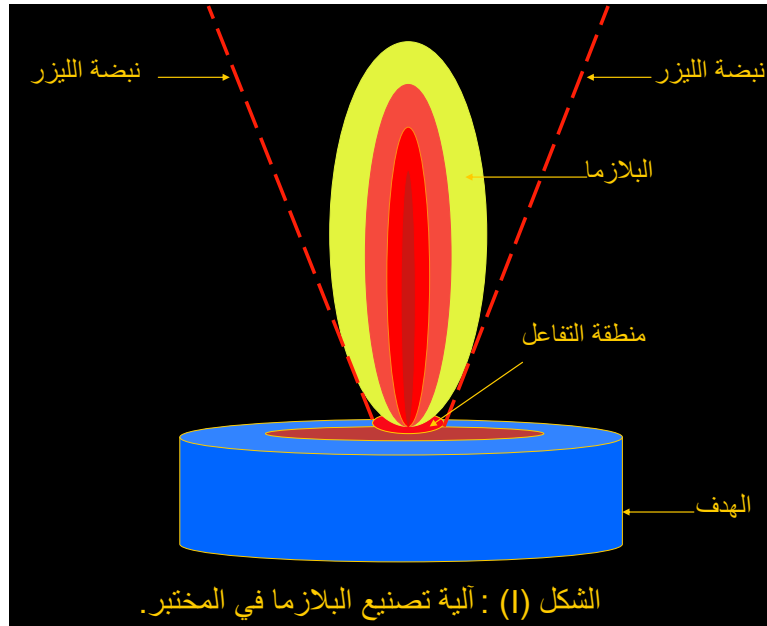
I-2- طريقة البحث ومواده:

يعدّ البحث عملاً تجريبياً، لذلك فهو يعتمد كلياً على النتائج التجريبية المقيسة، إذ تمّ في البدء رسم الخطوط الطيفية لبلازما التوتياء Zn بواسطة الكمبيوتر، المتصل مباشرة مع أجهزة القياس المستخدمة في توليد البلازما. كما تمّ قياس كثافة الطاقة الإشعاعية للنبضات الليزرية، وتسجيل درجات حرارة البلازما في الأجواء الغازية المدروسة، ومن ثمّ حساب وسطاء التعرض والانزياح للخطوط الطيفية.

تمّ إجراء هذا البحث التجريبي في المعهد القومي لعلوم الليزر بجامعة القاهرة في جمهورية مصر العربية خلال فترة الإيفاد بمهمة البحث العلمي.

II- توليد البلازما باستخدام الليزر النبضي:

إن ضوء الليزر عبارة عن تنذب مجالين متعامدين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي، وأي زيادة في المجال الكهربائي والمغناطيسي يؤدي إلى زيادة شدة شعاع الليزر. إن شدة المجال الكهربائي لشعاع الليزر تبلغ $5.10^9 V.cm^{-1}$ عندما تكون كثافة استطاعة نبضته $3.10^{16} W.cm^{-2}$ ، وفي أيامنا هذه تصل كثافة استطاعة بعض أنواع الليزر [1] إلى ما يقارب $10^{18} W.cm^{-2}$ ، إذ إن هذا المجال لهذه الأشعة يفوق بكثير المجال الكهربائي الذي يربط ذرات المواد الصلبة بعضها ببعض. وبذلك فإن المجال الكهربائي لشعاع الليزر سوف يؤثر في إلكترونات المواد الصلبة ويفصلها عن الذرات تاركاً أيونات موجبة. وبهذا يحول الليزر جزءاً من المادة الصلبة إلى حالة بلازما. يتضح مما سبق أنه يمكن استخدام أشعة الليزر المركزة لإنتاج بلازما عند درجات حرارة عالية جداً داخل المختبر. يوضح الشكل (I) كيفية تصنيع البلازما في المختبر باستخدام الليزر.



إن طاقة الفوتون $E_f = 1,155 eV = 18,48 \cdot 10^{-20} J$ بشكل عام أقل من طاقة تشتت الذرات والجزيئات (طاقة التشتت الوسطية بحدود 10 eV)، لكن طاقة النبضة الليزرية الواحدة $E = 250 mJ$ ، وهي تحوي على $13,5 \cdot 10^{17}$ فوتون، ومن ثمّ فإن توليد البلازما هو أسلوب متعدد الفوتونات [2]. بنتيجة العملية المتعددة الفوتونات الموجهة على نقطة معينة من الهدف يحدث تسخين محلي على السطح وتتبخر مادة الهدف، حيث تتشكل الإلكترونات

الأولية (والأيونات الأولية)، وفي نفس الوقت يحدث امتصاص كبير للفوتونات معاً أو تتابعياً بسبب التأين. تمتص الإلكترونات الحرة الطاقة الضوئية للنبضة الليزرية عن طريق إشعاع الكبح العكسي فتتسارع الإلكترونات وتتصادم مع ذرة معتدلة ومع فوتون، والنتيجة هي أن كل إلكترون حر يكتسب طاقة الفوتون فيزيد من طاقته الحركية. عندما تبلغ الإلكترونات المتسارعة طاقة التأين، تتصادم مع الذرات المعتدلة مسببة تشتت الذرات ومن ثم يتم الحصول على إلكترونات طاقتها منخفضة تساهم في عمليتي الامتصاص والتسارع، وبهذا الشكل يحدث تشتت الغاز مكوناً البلازما. كي تكون حزمة الليزر قادرة على الولوج في البلازما [3] يجب أن يكون تردد شعاع الليزر $\nu_L = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$ أكبر من تردد اهتزازات البلازما ν_p ، حيث $\nu_p = 9,10^3 \cdot \sqrt{N_e}$ و N_e تركيز الإلكترونات مأخوذاً في cm^{-3} ، وبالتالي فإن:

$$\nu_L > \nu_p \Rightarrow 2,8 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} > 9,10^3 \sqrt{N_e} \text{ s}^{-1}$$

$$7,84 \cdot 10^{28} > 81 \cdot 10^6 N_e \quad \text{أو:}$$

$$N_e < 97 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad \text{ومنه:}$$

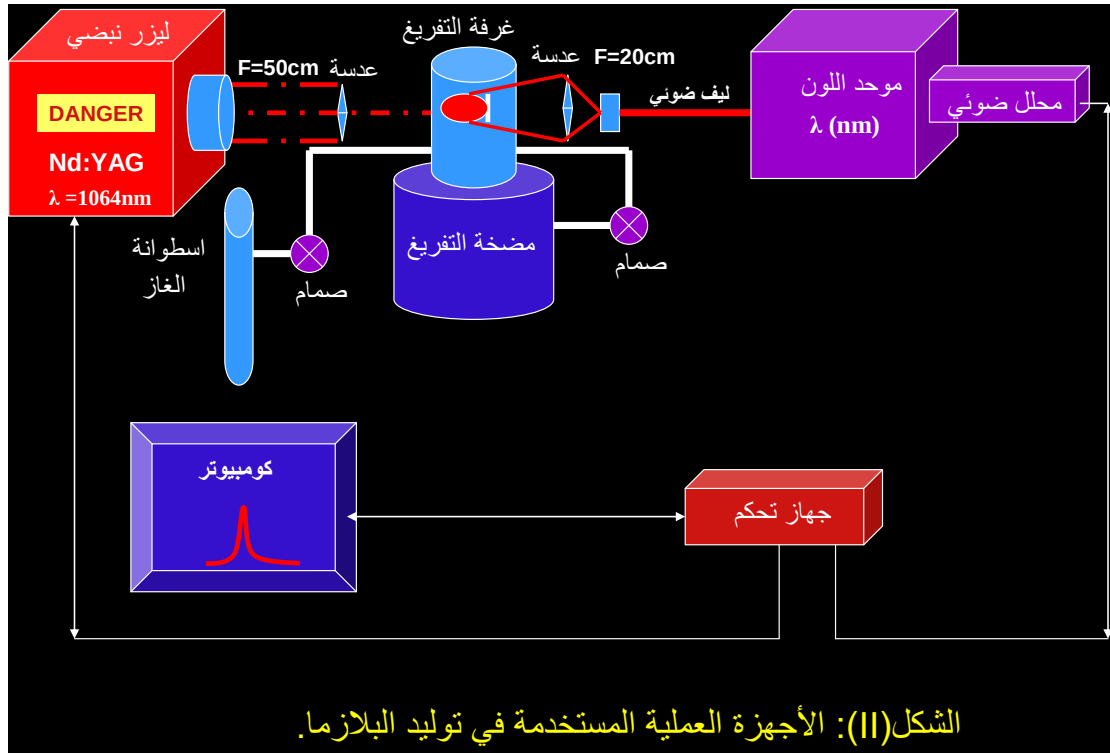
وعند توقف نبضات الليزر تتوقف عملية تشكل البلازما وفي هذه الحالة تتمدد البلازما وتبرد.

II - الأجهزة والأدوات:

تستخدم في هذا البحث أجهزة حديثة ذات تقنية عالية كما في الشكل (II)، وتتألف مما يلي:

- 1- **جهاز الليزر:** تم استخدام ليزر نبضي عالي الطاقة (Nd:YAG) مادته الفعالة (Nd^{+3}) تشكل جزءاً من وسط بلوري YAG يعطي نبضات طول موجتها $\lambda = 1064 \text{ nm}$.
- 2- **غرفة التفريغ:** وهي عبارة عن أسطوانة مفرغة مصنوعة من مادة (STAINLESS STEEL) قطرها الداخلي 25cm، وقطرها الخارجي 27cm، وارتفاعها 30cm، مجهزة بست فتحات جانبية لدخول نبضات الليزر والغاز ومراقبة البلازما المتولدة. وتتصل مباشرة مع مضخة التفريغ.
- 3- **مضخة التفريغ:** صممت خصيصاً لتتاسب غرفة التفريغ المذكورة أعلاه، ومهمتها تفريغ الغرفة من محتوياتها (هواء، غاز)، ويتم التحكم بعملية التفريغ باستخدام صمامات ومقاييس ضغط.
- 4- **موحد اللون:** وهو عبارة عن جهاز متطور مجهز بشقوق ضيقة، تستخدم لدخول الأشعة المتولدة عن البلازما وخروجها. يسمح شق الدخول لضوء البلازما بالسقوط فوق عنصر تشتيت، وهذا بدوره يؤدي إلى انحراف الضوء بزاوية تتعلق بطول الموجة. أما شق الخروج فيوضع بطريقة تسمح بمرور حزمة ضيقة من طول الموجة لكل نقطة من طيف البلازما المتولدة.
- 5- **المحلل الضوئي:** مهمته استقبال ضوء البلازما الخارج من موحد اللون وتحويله إلى إشارات كهربائية، يتم نقلها إلى جهاز كومبيوتر، مجهز ببرامج متطورة ومحدثة مرافقة لمجموعة موحد اللون والمحلل الضوئي، حيث يتم تخزين الخطوط الطيفية الناتجة عن البلازما المتولدة وتحليلها.
- 6- **جهاز كومبيوتر:** مجهز ببرامج خاصة تسمح بتخزين الخطوط الطيفية للبلازما المتولدة وتحليلها ورسمها.
- 7- **جهاز تحكم:** يتصل هذا الجهاز مع المحلل الضوئي وجهاز الكومبيوتر وجهاز الليزر، ويعمل على تشغيل الأجهزة السابقة في اللحظة نفسها عند انطلاق النبضة الليزرية.

- 8- **العينة (الهدف):** تم اختيار مادة التوتياء Zn (99,999 % نقاء) كهدف لتوليد البلازما، لأن أطياف هذه المادة غير مدروسة سابقاً. يوضع الهدف داخل غرفة التفريغ ويتم التحكم بوضعيته مع المحافظة على الوسط الغازي المحيط به، وذلك لإجراء القياسات فوق السطح المصقول، وليس فوق الأثر المتروك من قبل القياسات السابقة.
- 9- **ألياف ضوئية:** مهمتها نقل ضوء البلازما إلى شق الدخول في موحد اللون، باستخدام عدسات مجمعة للضوء.
- 10- **عدسات ومواسير:** تستخدم لتوجيه نبضة الليزر بشكل عمودي على سطح العينة (الهدف) المثبتة بوضعية أفقية داخل غرفة التفريغ.
- 11- **اسطوانات غاز:** تحوي غاز النيون (Ne) والنتروجين (N_2) والأرغون (Ar)، وتستخدم كوسط محيط بمادة الهدف داخل غرفة التفريغ، ويتم التحكم بكمية الغاز بواسطة صمامات ومقاييس ضغط.
- 12- **أجهزة قياس أخرى:** جهاز قياس طاقة النبضة الليزرية، أجهزة قياس نقاوة العينة وكثافتها وصقلها.



III - النتائج والمناقشة:

تتناقص طاقة الليزر نتيجة الاستخدام مع الزمن، ومن ثمَّ يجب قياسها بدقة قبل البدء بالخطوات العملية، هذا يعني أن كثافة استطاعة النبضة الليزرية تتناقص أيضاً مع الزمن. لذلك تمَّ قياس طاقة النبضة الليزرية، إذ كانت تساوي: $E=250\text{mJ}$. وبناءً على ذلك تمَّ حساب وسطاء الليزر النبضي كما يلي:

- طول موجة النبضة الليزرية: $\lambda=1064\text{nm}$.
- تواتر النبضة الليزرية: $\nu = \frac{c}{\lambda} = 2,8.10^{14} \text{ Hz}$.
- طاقة الفوتون الواحد في النبضة الليزرية: $E_f = h\nu = 18,48.10^{-20} \text{ J} = 1,155\text{eV}$.
- عدد الفوتونات الموجودة في النبضة: $N = \frac{E}{E_f} = 13,5.10^{17}$.

- زمن استمرار النبضة الليزرية: $t = 10\text{s}$.
 - استطاعة النبضة الليزرية: $P = \frac{E}{t} = 25\text{MW}$.
 - كثافة استطاعة النبضة الليزرية: $W = \frac{P}{S} = \frac{25\text{MW}}{\pi.r^2} = 32\text{MW.cm}^{-2}$. وذلك دون استخدام عدسات مجمعة، علماً أن قطر أثر النبضة $d=1\text{cm}$ و $(r = \frac{d}{2})$.
 - نصف عرض الخط الطيفي للنبضة 1cm^{-1} ، حيث $1\text{cm}^{-1} = 30\text{GHz}$.
- لقد تمَّ قياس تركيز الإلكترونات N_e كناتج لكثافة الطاقة الإشعاعية للنبضة الليزرية، أي: $N_e = f(W)$ ، وذلك اعتماداً على برنامج القياس المجهز به الكمبيوتر، ويعطي هذا البرنامج تركيز الإلكترونات لحظة إطلاق النبضة الليزرية. ومن ثمَّ حساب وسطاء التعرض (w) للخطوط الطيفية للبلازما الناتجة اعتماداً على العلاقة التالية:
- $$\Delta\lambda' = w \left(\frac{N_e}{10^{17}} \right)$$
- حيث $\Delta\lambda'$ نصف عرض الخط الطيفي الناتج عند منتصف طوله، و N_e تركيز الإلكترونات [4]. ومن أجل جميع الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما الناتجة، تمَّ قياس $\Delta\lambda'$ ، حيث $\Delta\lambda' = 5\text{nm}$ ، ومن الملاحظ أن وسطاء التعرض للخطوط الطيفية تزداد كلما تناقص تركيز الإلكترونات N_e ، أي كلما تناقصت كثافة استطاعة النبضة الليزرية (W)، كما هو موضح في الجدول (1):

الجدول (1): وسطاء التعرض (w) للخطوط الطيفية الناتجة عن البلازما المتولدة.

$W(\text{MW.cm}^{-2})$	795,7	198,9	49,4
$N_e(\text{cm}^{-3})$	$335,69.10^{17}$	$83,9.10^{17}$	$20,97.10^{17}$
$w(\text{nm})$	0,015	0,050	0,238

تمَّ استخدام عدسة مجمعة ($F=50\text{cm}$)، مهمتها تجميع النبضة الليزرية عند السطح المصقول للعينة Zn، بحيث يكون نصف قطر أثر النبضة الليزرية عند ذلك السطح يساوي $R=1\text{mm}$ ، وفي هذه الحالة حُسبت كثافة استطاعة النبضة الليزرية:

$$W = \frac{P}{S} = \frac{25\text{MW}}{\pi.r^2} = \frac{25\text{MW}}{\pi(0,1\text{cm})^2} = 795,7\text{MW.cm}^{-2}$$

وُجِدَ أن الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما الناتجة توافق الأطوال الموجية المرتبة في الجدول (2)، التالي:

الجدول (2): الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما المتولدة عن مادة التوتياء.

$\lambda(\text{nm})$	305,5	305,1	304,4
الغاز	Ne	N_2	Ar

أما بالنسبة لشدة الخطوط الطيفية فإنها تبقى ثابتة وتساوي 6,3 وحدة اختيارية، لكنه يطرأ انزياح على الخطوط الطيفية مقداره $\Delta\lambda = 0,4\text{nm}$ في حالة الغاز N_2 و $\Delta\lambda = 1,1\text{nm}$ في حالة الغاز Ar، وذلك بالنسبة للخط الطيفي المتولد في حالة غاز النيون Ne.

إن القياس المباشر لدرجة حرارة البلازما المتولدة، أعطى قيماً تتراوح بين (9000K – 9500K)، ولوحظ أنها تتغير بتغير الجو الغازي المحيط بمادة الهدف Zn. ترتبط درجة الحرارة المطلقة T للغاز بكتلته الجزيئية الغرامية μ

بالعلاقة التالية $T = \alpha \mu$ ، حيث α مقدار ثابت يتعلق بضغط الغاز وكثافته، ولهذا تتغير μ عند تغير الغاز، وعند ازديادها تزداد درجة حرارة الغاز T ، مما يؤدي إلى انزياح الخطوط الطيفية للبلازما نحو أطوال موجية أقصر. إن تناقص تركيز الإلكترونات ودرجة الحرارة ودرجتها المرافقة لانتشار البلازما، يغير بشكل طفيف صفات التوزيع الطيفي للإشعاع الصادر عن البلازما. يُلاحظ في اللحظات الأولى إشعاع مستمر شديد عائد إلى درجات الحرارة العالية T ، وتركيز الإلكترونات العالي N_e ، ويتفق التوزيع الطيفي لهذا الإشعاع مع التوزيع الطيفي لإشعاع الجسم الأسود المثالي، وفيما بعد يُلاحظ تعرض كبير في خطوط الإصدار يعود لمفعول ستارك (Stark)، نتيجة التركيز العالي للإلكترونات الموجودة في البلازما [5]. إن تواتر إشعاع البلازما المنبعث (ν) من أجل الخط الطيفي $\lambda = 305,5 \text{ nm}$ يساوي $\nu = 9,8.10^{14} \text{ Hz}$ ، لذلك فإن كثافة الطاقة الإشعاعية $\rho(\nu)$ المنبعثة عن البلازما يمكن وصفها بالعلاقة التالية:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

حيث $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$ عدد درجات الحرية (عدد أنواع الاهتزازات الممكنة) في وحدة الحجم وواحدة التواتر، أما المقدار $\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$ فيمثل الطاقة الوسطى الموافقة لدرجة حرية واحدة، و c سرعة الضوء في الخلاء وبملاحظة أن $\langle e^{h\nu/kT} \rangle \gg 1$ ، لأن التواتر ν عالي جداً، وبالتالي يمكن إهمال العدد 1 أمام المقدار $e^{h\nu/kT}$ ، وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن $\rho(\lambda) = \rho(\nu) \frac{c}{\lambda^2}$ ، فإنه يمكن التعبير عن كثافة الطاقة الإشعاعية $\rho(\lambda)$ بدلالة طول موجة [6] إشعاع البلازما λ بالعلاقة التالية:

$$\rho(\lambda) = 8\pi hc \lambda^{-5} e^{-hc/\lambda kT}$$

والتابع $\rho(\lambda)$ يبلغ نهاية حدية عظمى عندما $\frac{d\rho(\lambda)}{d\lambda} = 0$ ، أي:

$$\frac{d\rho(\lambda)}{d\lambda} = 8\pi h c e^{-hc/\lambda kT} \lambda^{-6} \left(\frac{hc}{\lambda kT} - 5 \right) = 0$$

وبالتالي فإن: $T\lambda_{\max} = 2,88.10^{-3} \text{ mK}$ ، وبالاستفادة من العلاقة الناتجة،

يمكن حساب درجات حرارة البلازما الناتجة وهي تتفق تماماً مع النتائج التجريبية.

إن نتيجة تحليل الخطوط الطيفية الناتجة مرتبة في الجدولين (3) و (4) التاليين:

الجدول (3): الانزياح في الخطوط الطيفية لبلازما التوتياء Zn بتغير الغاز المحيط بالهدف وذلك تحت ضغط ثابت ($P=1\text{bar}$).

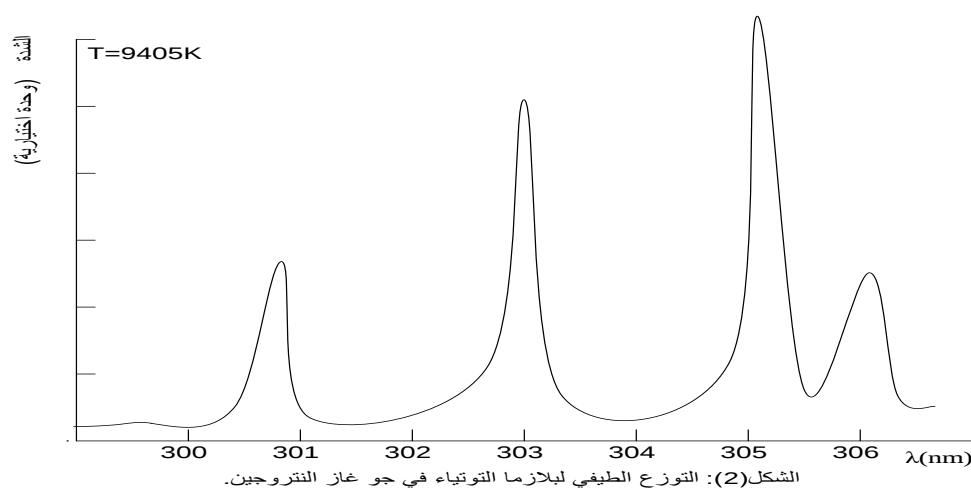
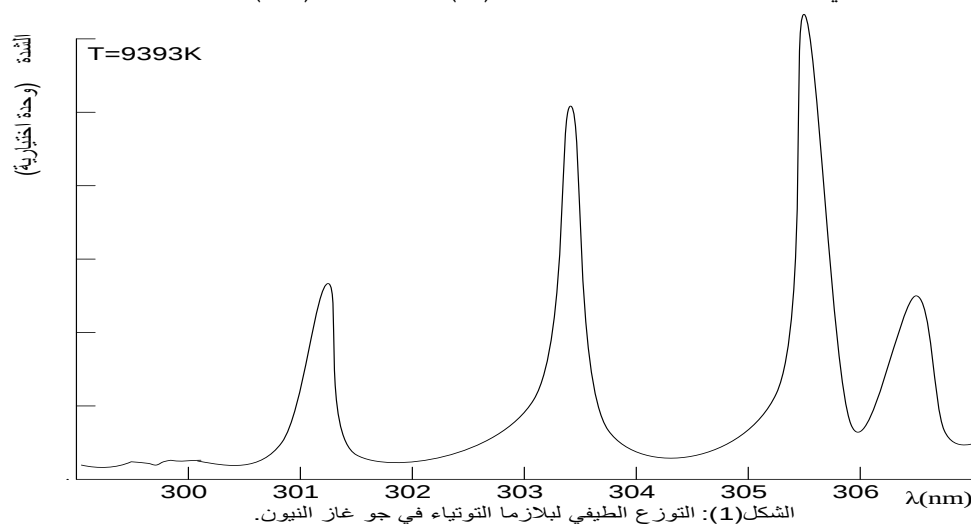
الغاز	FW ($g.mol^{-1}$)	λ (nm)	T (K)	$\Delta\lambda(nm)$	الشدة (وحدة اختيارية)
Ne	20,18	305,5	9393	0	6,3
N_2	28	305,1	9405	0,4	6,3
Ar	39,95	304,4	9427	1,1	6,3

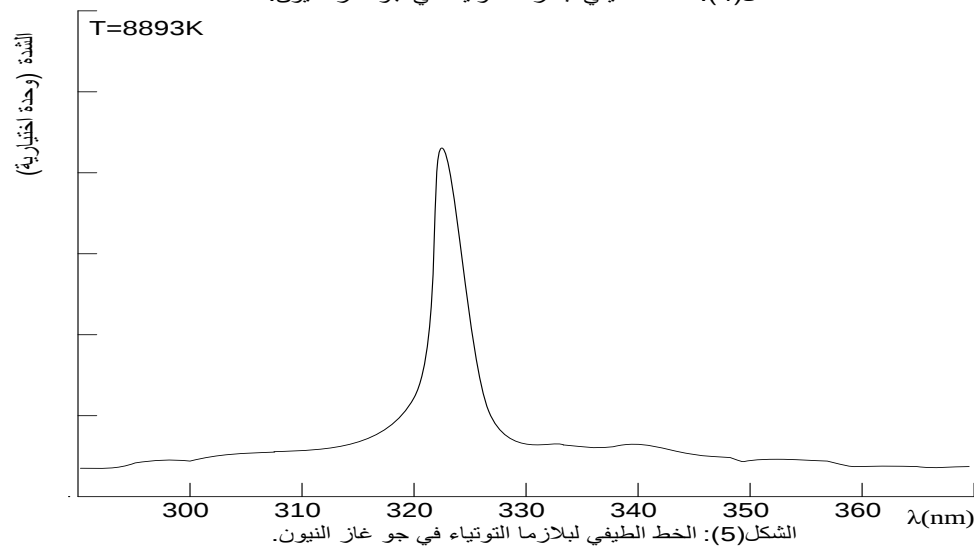
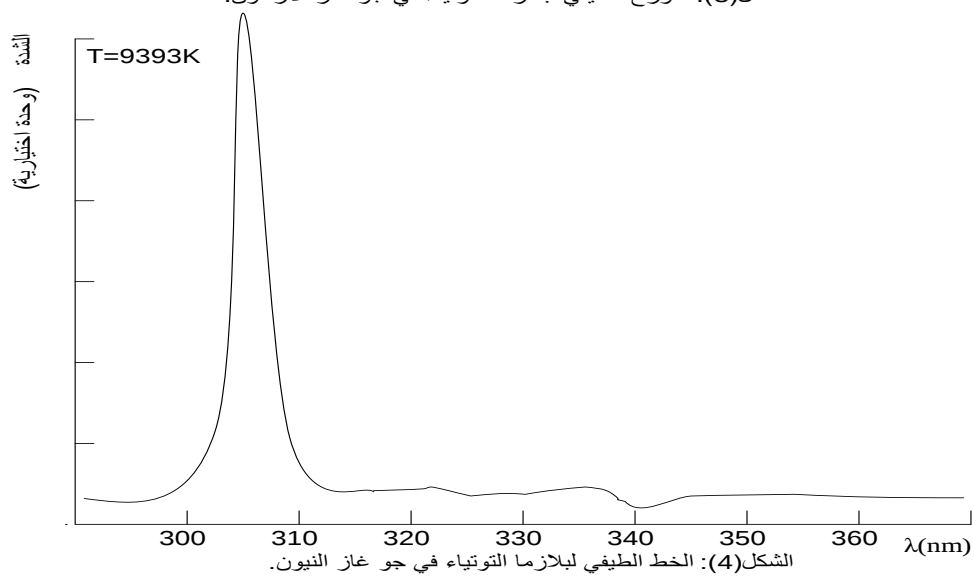
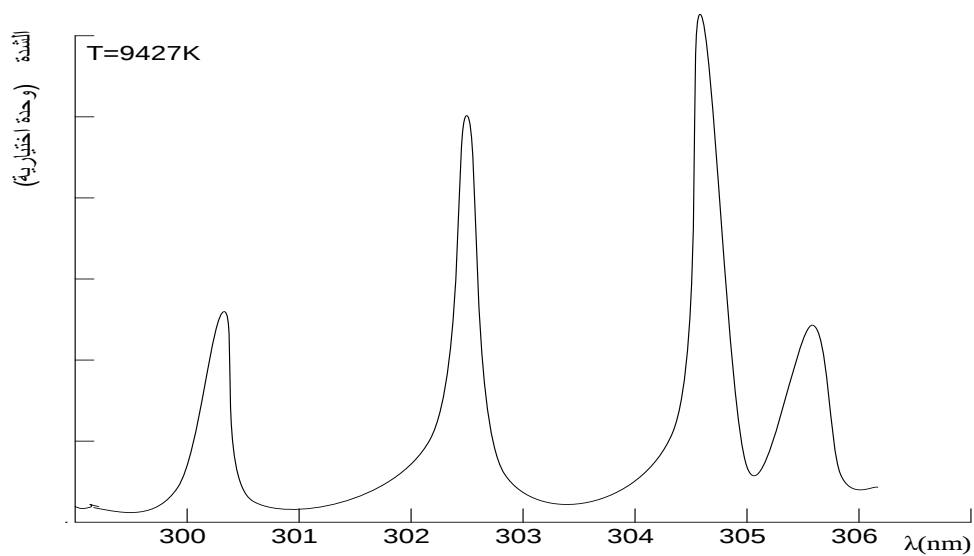
الجدول (4): تغير طول موجة البلازما ودرجة حرارتها بتغير كثافة استطاعة النبضة الليزرية W

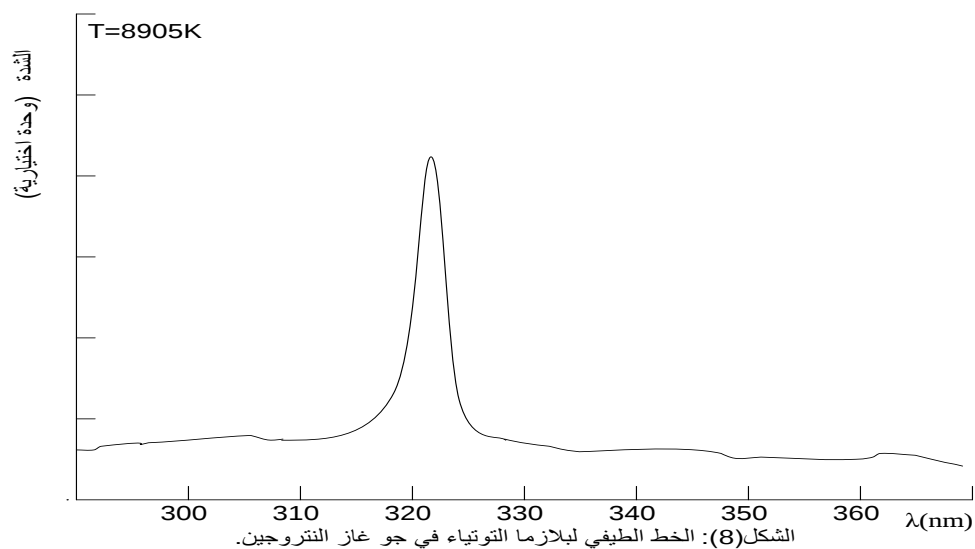
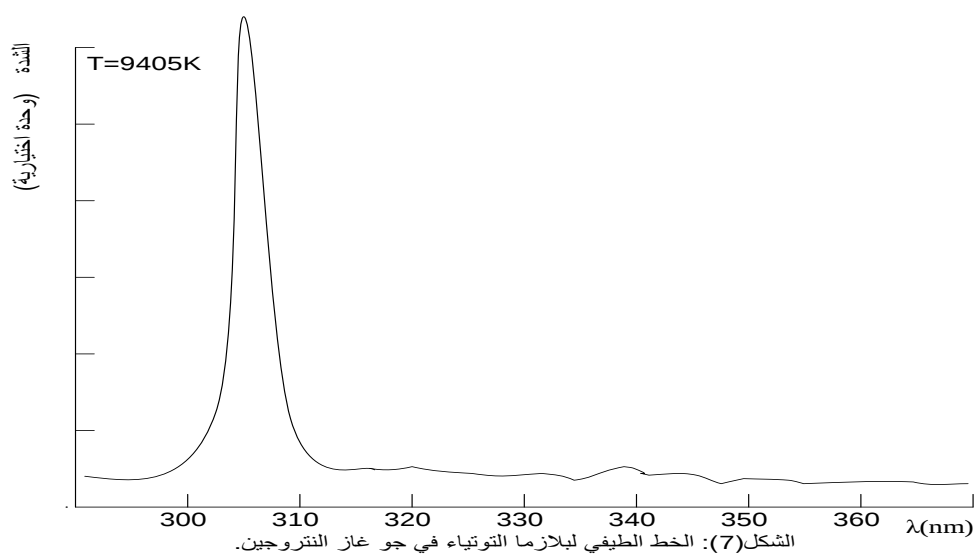
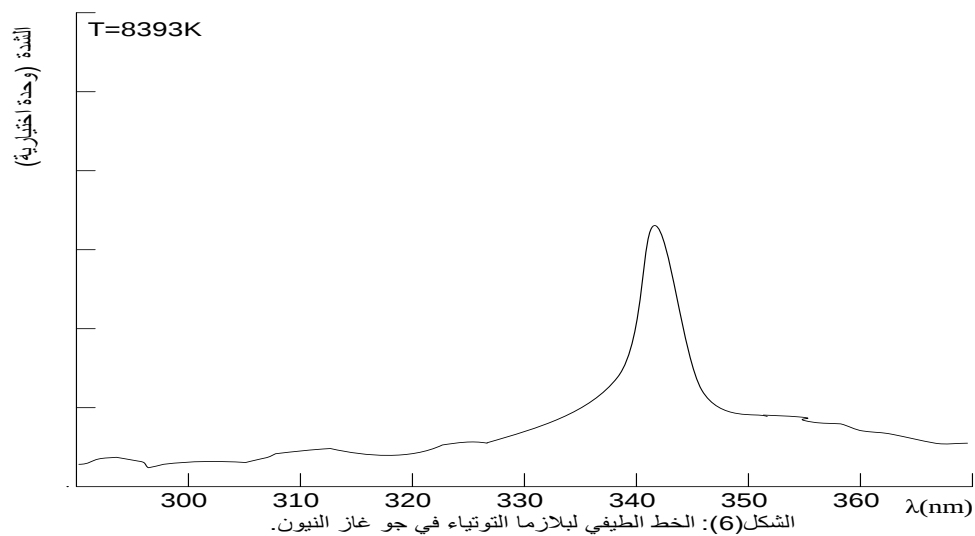
والجو الغازي تحت ضغط ثابت ($P=1\text{bar}$).

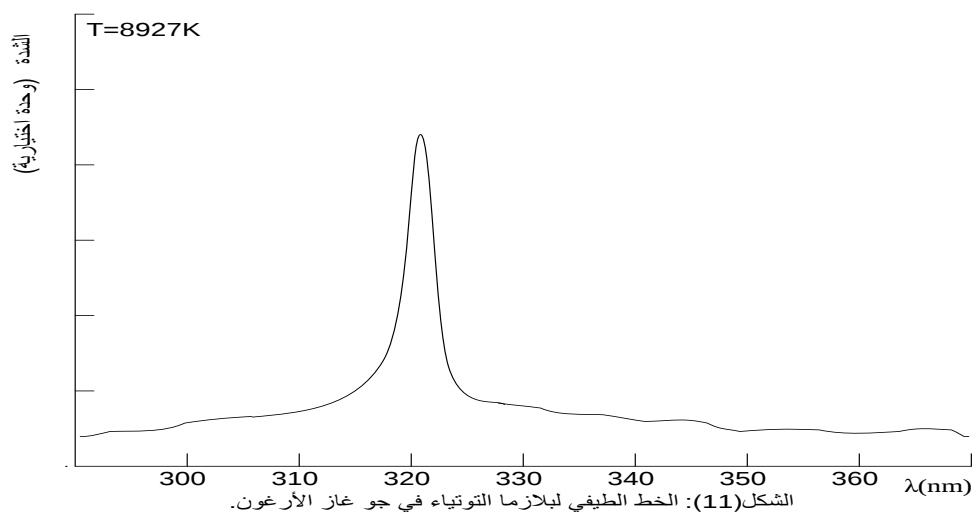
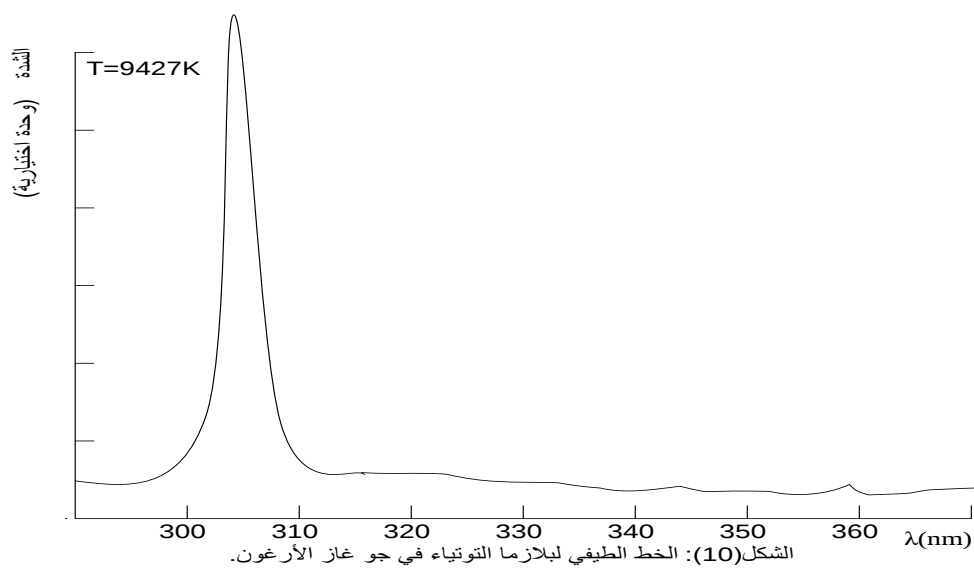
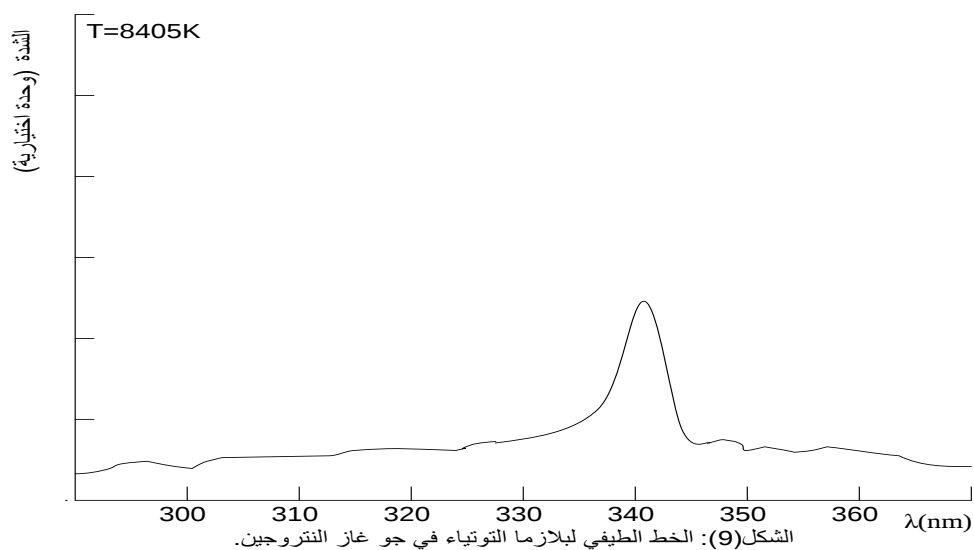
الغاز	λ (nm)	T (K)	W ($MW.cm^{-2}$)	R (mm)	الشدة (وحدة اختيارية)
Ne	305,5	9393	795,7	1	6,3
	322,6	8893	198,9	2	4,3
	341,9	8393	49,7	3	3,3
N_2	305,1	9405	795,7	1	6,3
	322,3	8905	198,9	2	4,3
	341,4	8405	49,7	3	3,3
Ar	304,4	9427	795,7	1	6,3
	321,4	8927	198,9	2	4,3
	340,5	8427	49,7	3	3,3

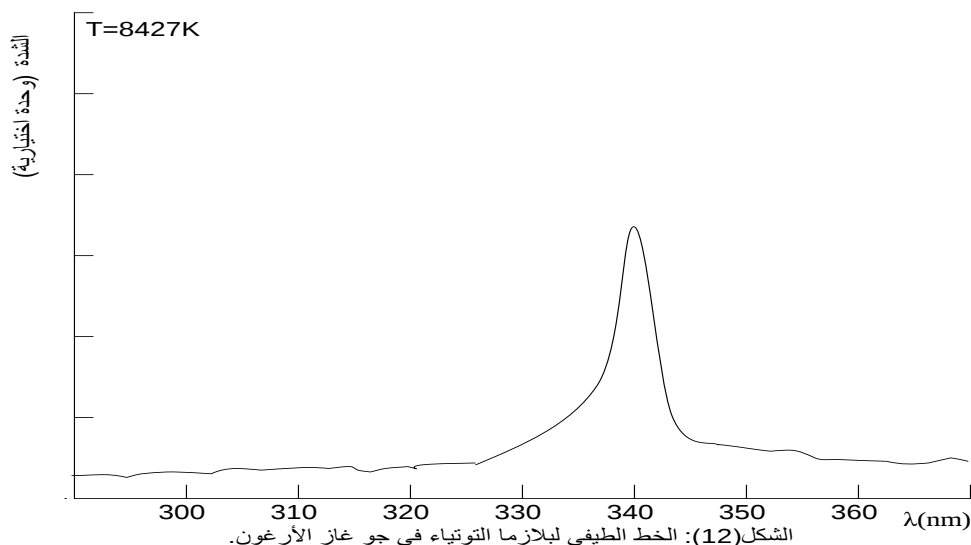
إن الخطوط الطيفية لبلازما التوتياء (Zn) المتولدة بواسطة شعاع الليزر، وفي أجواء غازية مختلفة ودرجات حرارة مختلفة، موضحة في الأشكال المرفقة بدءاً من الشكل (1) وحتى الشكل (12).











يعود سبب دراسة أطيف بلازما التوتياء ضمن وسط غازي لتحديد الوسط البلازمي المناسب لانتشار البلازما، ويتم فصل الخطوط الطيفية بعضها عن بعض من أجل الغاز الواحد بتغيير كثافة استطاعة النبضة الليزرية، ومن أجل الغازات المختلفة بتغيير اسطوانة الغاز المستخدم.

نشير إلى أن الارتياح النسبي في الأجهزة المستخدمة هو 0,1%، أما بالنسبة لبقية الوسطاء الأخرى المحسوبة رياضياً فإن الارتياح النسبي فيها يساوي $10,1\% = 0,1\% + \frac{1}{10}$.

4- الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تحدث البلازما في اتجاه حزمة الليزر وفي جميع الأوساط الغازية.
- 2- تتعلق صفات إشعاع البلازما بتركيز الإلكترونات ودرجة الحرارة المرافقة لها، ومن ثم فهي تتعلق بكثافة استطاعة الليزر.
- 3- إن درجة حرارة البلازما الناتجة بواسطة أشعة الليزر أعلى بكثير من درجة حرارة البلازما الناتجة بالانفراغ الكهربائي.
- 4- إن تركيز الإلكترونات الناتج بواسطة أشعة الليزر أكبر بكثير من تركيز الإلكترونات الناتج بالانفراغ الكهربائي.
- 5- يبقى للخطوط الطيفية لبلازما التوتياء الشدة نفسها عند تغيير الجو الغازي المحيط بالهدف، لكنها تتزاح نحو أطوال موجية أقصر من أجل الغازات المدروسة ($\Delta\lambda = 0,4\text{nm}$ و $\Delta\lambda = 1,1\text{nm}$)، وتتغير درجة حرارة البلازما.
- 6- عند زيادة كثافة استطاعة النبضة الليزرية تزداد درجة حرارة البلازما وكثافة الإلكترونات فيها، ومن ثم تتزاح الخطوط الطيفية للبلازما نحو أطوال موجية أقصر، مما يؤدي إلى تغير لون البلازما، وتغير لون الهدف.
- 7- من خلال دراسة أطيف البلازما المتولدة عن هدف معين، يمكن تعرّف الخواص الفيزيائية لهذا الهدف على نحو أفضل، كتحديد درجة الحرارة المطلقة T اللازمة لتشكيل البلازما الساخنة لمادة التوتياء، وعلاقة درجة الحرارة هذه بكثافة استطاعة النبضة الليزرية W وبطول موجتها λ ، كما أن تحديد تركيز الإلكترونات $N_e = \sum_z n_z \cdot z$ ، حيث n_z تركيز الايونات ذات الشحنة z في العينة، يعطي معلومات مهمة عن بنية المادة.

المراجع:

1. BLASZCZAK, Z. J., GAUDEN, P. G. *Plasma Production by Laser*, Poznan, 2004, 367.
2. KACZMAREK, F. M. *Wstep do Fiziki Laserow*, Warszawa, 1996, 559.
3. MULSER, P. J., SIEGEL, R. G., WITKOWSKI, S. M. *Physics Reports*, Warszawa, 2003, 272.
4. KALISKI, S. T., DENUS, S. N., JANKIEWICZ, Z. R. *Elektronika Kwantowa i Optyka Nieliniowa*, Poznan, 2004, 367.
5. BLASZCZAK, Z. J., *Lasery-Synteza Jadrowa*, Poznan, 2004, 203.
6. ZIMMER, L., TACHIBANA, S. *Laser induced plasma spectroscopy for local equivalence ratio measurements in an oscillating combustion environment*. Elsevier Japan, Vol. 182, N° 852, 2006, 1-7.