

استخدام الليزر الياقوتي عالي الطاقة في توليد البلازما لمادة الألمنيوم (الهدف) ودراسة أطيافها

د. أنور الدويري*

د. غازي حاتم**

سوزان بليدي***

تاريخ الإيداع 12 / 4 / 2018. قُبل للنشر في 16 / 5 / 2018

□ ملخص □

يدرس هذا البحث مبدأ عمل الليزر الياقوتي وآلية تطويره للحصول على ليزر نبضي عالي الطاقة حيث تبلغ شدة نبضته $W = 891.7 \times 10^{10} W.m^{-2}$ وشدة حقله الكهربائي $E_0 = 82 \times 10^6 V.m^{-1}$ لحظة خروج نبضته من الليزر. ومن تمّ قياس وحساب جميع وسطاء هذا الليزر وهي: طول الموجه λ ، التواتر ν ، طاقة الفوتون الواحد E_{photon} ، عدد فوتونات النبضة الواحدة N ، استطاعة النبضة P ، شدة النبضة I وشدة الحقل الكهربائي E . ودراسة الخطوط الطيفية للبلازما المتولدة بتغيير الوسط الغازي المحيط بمادة الهدف، وتحديد ثوابت الانزياح $\Delta\lambda$ للخطوط الطيفية الناتجة. كما تمّ 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، تمّ تعيين وسطاء التعرض ω والانزياح $\Delta\lambda$ للخطوط الطيفية، وتركيز الإلكترونات N_e في البلازما. وأخيراً تمّ حساب الأرتيانات النسبية والمطلقة المرتكبة في قياس المقادير الفيزيائية المقاسة.

الكلمات المفتاحية: الليزر - الياقوت - عالي الطاقة - البلازما - الطيف - الألمنيوم.

* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

**مدرس - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

***طالبة ماجستير - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

Using high energy ruby laser to generate plasma for aluminum material (object) and study its spectrums

Dr. Anwar Al-Doiari*
Dr. Ghazi Hatem**
Suzan Blide***

(Received 12 / 4 / 2018. Accepted 16 / 5 / 2018)

□ ABSTRACT □

This research studies the principle of the work of laser sapphire and its development mechanism to obtain a high-energy pulse laser where the intensity of pulse $W = 891.7 \times 10^{10} \text{ W.m}^{-2}$ and intensity of its electric field $E_0 = 82 \times 10^6 \text{ V.m}^{-1}$ can be reached when the pulse is out of the laser. And then measure and calculate all parameters of this laser are: the length of the wave λ , frequency ν , the energy of a photon E_{photon} , the number of photons N of one pulse, pulse capacity P , intensity of pulse I and intensity of electric field E . Hence, study the spectral lines of the plasma generated by changing the gas medium surrounding the target material, and determine the displacement constants $\Delta\lambda$ of the resulting spectral lines. The spectral lines are then studied by varying the radiation energy density $W(\text{MW.cm}^{-2})$ of the laser pulse used, and its relation to the absolute temperature T of the plasma.

As the result of this study, the parameters widening ω and shifting $\Delta\lambda$ of spectrum lines and the concentration of electrons N_e in plasma had been calculated. Finally, the relative and absolute relativities measured in measured physical quantities were calculated.

Keywords: Laser - ruby - high energy - plasma - spectrum - aluminum.

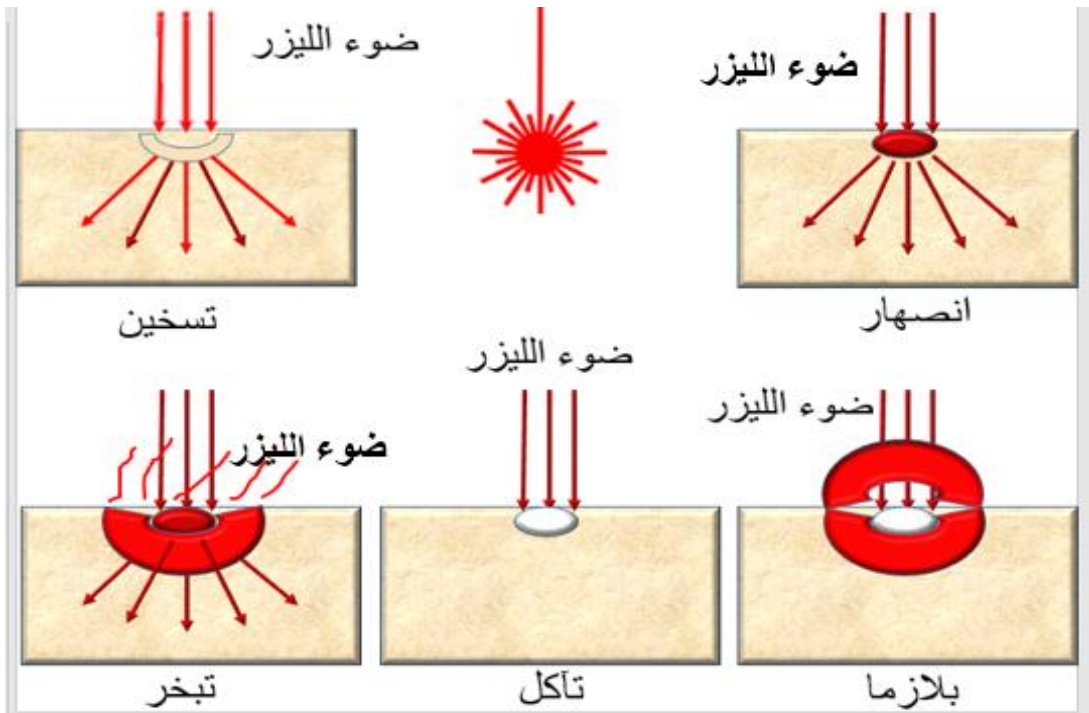
* Professor - Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University – Lattakia – Syria.

** Assistant Professor - Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University – Lattakia – Syria.

*** Postgraduate student - Department of Physics – Faculty of science – Tishreen University – Lattakia – Syria.

مقدمة:

وفرت الشدة العالية لشعاع الليزر، امكانية توليد البلازما الساخنة في المختبر، وتبلغ شدة المجال الكهربائي لشعاع الليزر المستخدم في هذه الدراسة $E = 82 \times 10^6 V.m^{-1}$ عندما تكون كثافة استطاعة نبضته $W = 891.7 \times 10^{10} W.m^{-2}$ ، وفي أيامنا هذه تصل شدة إشعاع بعض أنواع الليزر إلى ما يقارب $W = 10^{22} W.m^{-2}$ [1]. وبالمقارنة مع شدة إشعاع مصباح كهربائي عادي $60W$ على بعد متر أو مترين فهي لا تزيد عن $0.1 W.m^{-2}$ حيث أن المجال الكهربائي لهذه الأشعة يفوق بكثير المجال الكهربائي الذي يربط ذرات المواد الصلبة بعضها ببعض، وبذلك فإن المجال الكهربائي لشعاع الليزر حين يؤثر على إلكترونات المواد الصلبة يمكنه أن يفصلها عن الذرات تاركاً أيونات موجبة، وبهذا يحول الليزر جزء من المادة الصلبة إلى حالة بلازما. يتضح مما سبق أنه يمكن استخدام أشعة الليزر المركزة لإنتاج بلازما عند درجات حرارة عالية جداً داخل المختبر. تنقسم المواد من حيث الحالة إلى صلبة، سائلة، غازية وبلازما. فالمسافات التي تفصل بين الذرات في الحالة الصلبة صغيرة جداً مقارنة بالحالة السائلة والغازية والبلازما. فعند سقوط ضوء الليزر على أي مادة فإنه يحدث تغيرات لهذه المادة، ولكن يجب ان يكون معامل الامتصاص لهذا الطول الموجي للمادة عالي، مقارنة بنسبة الضوء المنعكس والنافذ عن سطح العينة. وتنقسم التفاعلات الناتجة عن الليزر مع المادة حرارياً إلى عدة أنواع وهي كالتالي: تفاعل ينتج عنه تسخين، تفاعل يحدث انصهار، تفاعل يحدث تبخر وتفاعل يحدث بلازما. وتحدث جميع هذه التفاعلات حسب قدرة المادة على امتصاص ضوء الليزر ومدى التغير الذي يمكن أن يحدثه فيها حسب خصائصها الحرارية ودرجة حرارة انصهارها وتبخرها [2].



الشكل (1): تفاعل شعاع الليزر مع المادة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تحديد جميع وسطاء الليزر الياقوتي عالي الطاقة المستخدم في البحث، واستخدامه في توليد البلازما الناتجة عن تفاعل شعاع الليزر مع مادة الألمنيوم Al ، ومن ثم دراسة أطياف البلازما الناتجة عن مواد صلبة في أجواء غازية مختلفة، وبالتالي التعرف على بعض الخواص الفيزيائية الجديدة لهذه المواد. ويهدف البحث إلى ما يلي:

- تحديد جميع وسطاء الليزر الياقوتي النبضي عالي الطاقة ذو الطول الموجي $\lambda = 694.3nm$ المستخدم في الدراسة.

- دراسة الخطوط الطيفية للبلازما الناتجة 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.
- حساب الارتياحات النسبية والمطلقة المرتكبة في قيم المقادير الفيزيائية المقاسة.

طرائق البحث ومواده:

يُعتبر البحث عملاً تجريبياً وتحليلياً، لذلك فهو يعتمد كلياً على النتائج التجريبية المقاسة من جهة، وتحليلها من جهة أخرى، حيث تم في البدء تجريبياً تحديد جميع وسطاء الليزر الياقوتي النبضي عالي الطاقة المستخدم في الدراسة عن طريق خدمة سكايب (Skype) والواتساب (WhatsApp) بالتعاون مع قسم الليزر (تفاعل شعاع الليزر مع المادة) - جامعة بوزنان في بولونيا، وذلك خلال العام الدراسي 2017-2018، ومن ثم حساب جميع وسطاء الليزر المتبقية والمتعلقة بالنتائج التجريبية.

ومن ثم رسم الخطوط الطيفية لبلازما الألمنيوم Al باستخدام برامج حديثة للكمبيوتر وهي:

- 1- Spectrum Analyzer for Win 10 64Bit
- 2- OriginPro 2017 64Bit

كما تم قياس كثافة الطاقة الإشعاعية للنبضات الليزرية، وتسجيل درجات حرارة البلازما في الأجواء الغازية المدروسة، و حساب وسطاء التعرض والانزياح للخطوط الطيفية.

2- ليزر الياقوت عالي الطاقة:

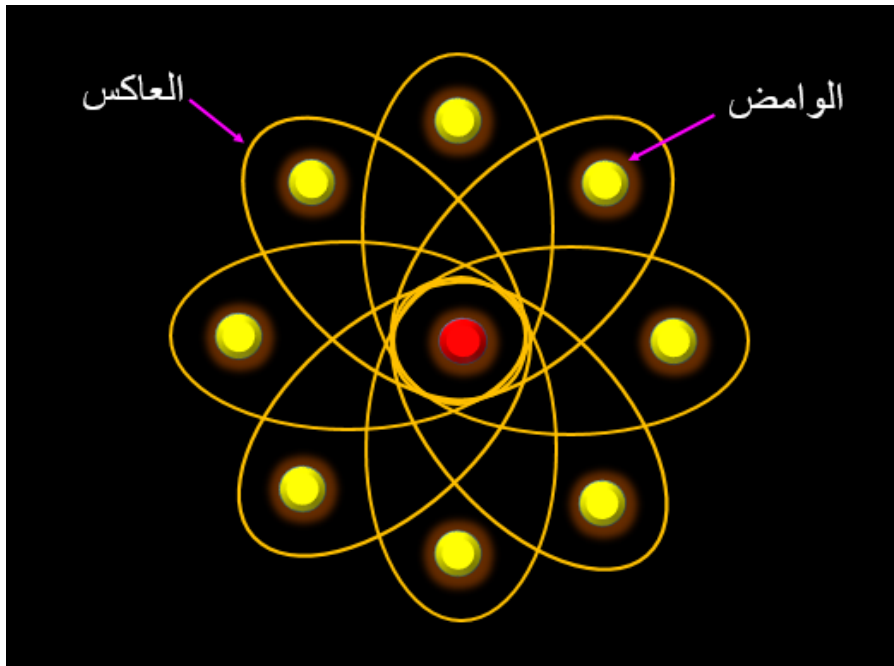
يتكون الوسط الليزري من بلورات الألومين Al_2O_3 ، استبدلت فيها نسبة صغيرة (0,05% وزناً) من أيونات الألمنيوم Al^{3+} بأيونات من الكروم Cr^{3+} .

تعمل ليزرات الياقوت عادة بالنظام النبضي Pulsed regime ويستعمل للتشغيل مصباح الكزينون Xe الوميضي بضغط (500Torr). الأبعاد النموذجية لأسطوانة الياقوت كالاتي: القطر يتراوح بين (5mm - 10mm) أما الطول فيتراوح بين (20cm - 5cm). ويمكن تشغيل ليزرات الياقوت بنظام الموجة المستمرة CW، حيث يتم الضخ بمصباح زئبقي ذي ضغط عالٍ [3].

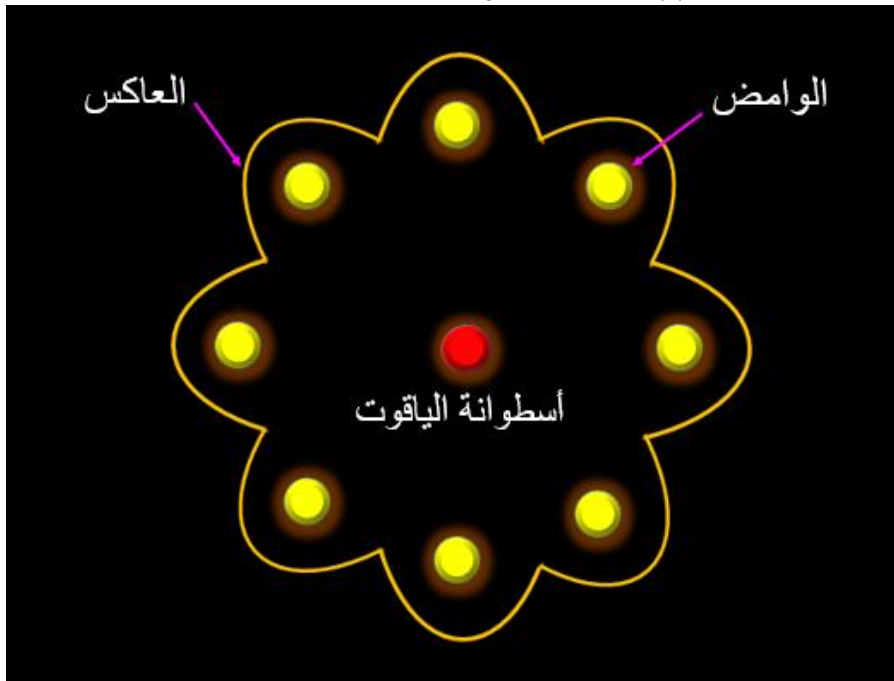
2-1- الوامض والعاكس:

لقد كان الوامض في البدء عبارة عن أنبوب حلزوني يحيط بأسطوانة الياقوت، ويحصل في داخله تفريغ كهربائي يسببه تيار كهربائي خارجي ذو فرق كمون عالٍ. يعطي هذا الوامض ضوءاً في كل

الاتجاهات ولا يمتص الياقوت من طاقته إلا جزءاً بسيطاً. لذلك استبدل به وامض أسطواني مستقيم وضع داخل أسطوانة كبيرة إهليجية القاعدة في إحدى بؤرتيها، ووضعت أسطوانة الياقوت بشكل مواز له في البؤرة الثانية. بحيث يكون سطح الأسطوانة الإهليجية الداخلي عاكساً للضوء ويلعب دور مرآة عاكسة. ومن المعروف رياضياً أن الشعاع الخارج من البؤرة الإهليجية إذا انعكس عن سطحها، يقع حتماً في البؤرة الأخرى. وهكذا تتجمع كل طاقة الوامض على أسطوانة الياقوت. وفي الليزر الحديثة يتم وضع أكثر من وامض تصل إلى ثمانية أو أكثر والعدد ذاته من العواكس الإهليجية مما يؤدي إلى مضاعفة طاقة النبضة الليزرية الناتجة كما في الشكل (2) والشكل (3)، [4].

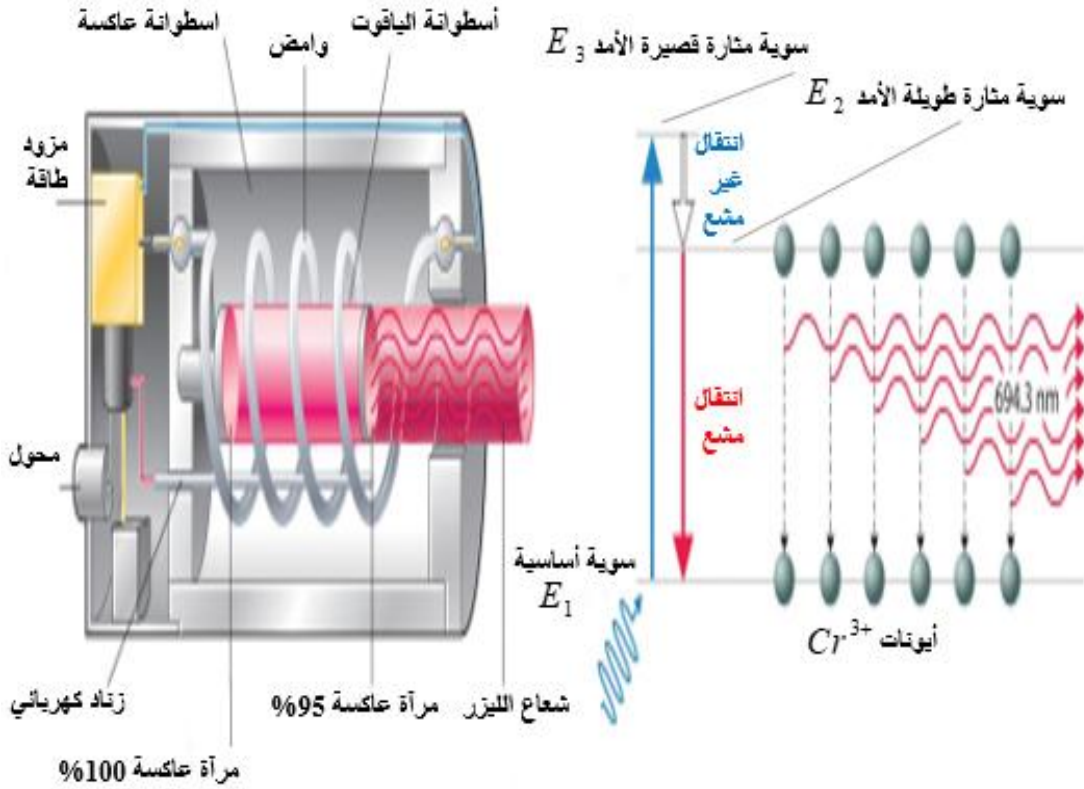


الشكل (2): مخطط يمثل توضع العاكس والوا مض وأسطوانة الياقوت.



الشكل (3): مقطع عرضي لجملة العاكس والوا مض وأسطوانة الياقوت المستخدمة في الدراسة.

إذا وجهنا ضوءاً قوياً صادراً من وامض ضوئي على أسطوانة الياقوت، فإن هذا الضوء يعطي الطاقة اللازمة للضخ فنثار أيونات الكروم من مستوي الطاقة الأساسي إلى عصابة من المستويات المثارة والمتقاربة جداً E_3 ، ثم تسقط هذه الذرات بسرعة إلى المستويات E_2 دون أن تتشع. وبما أن فترة حياة المستويات طويلة $\tau = 3 \times 10^{-3} s$ وهي فترة طويلة جداً في مجال الحديث عن فترة حياة مستويات طاقة الذرة، لذلك تتجمع الذرات لمدة طويلة في عصابة المستويات E_2 ويصبح عندنا انعكاس كبير جداً للأهلية بين E_2 وبين المستوي الأساسي [5]. مما يسمح للانبعاث القسري بأن يعطي أشعة ليزر قوية جداً. ونحصل على موجة ليزر أساسية طولها $\lambda = 694.3 nm$ كما في الشكل (4).



الشكل (4): يوضح بنية الليزر الياقوتي وآلية الضخ الليزري.

2-2- البلازما:

تعتبر البلازما الحالة الرابعة للمادة، فيتسخن الحالة الصلبة بشكلٍ كافٍ تصبح سائلة ومع زيادة التسخين تتحول إلى حالة غازية و عند درجات حرارة عالية جداً أكثر من $5000 K$ تصبح الطاقة الحركية للجسيمات من مرتبة طاقة التأين للجسيمات المعتدلة، وبهذا تكون المادة قد بلغت طور البلازما. وتختلف البلازما 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 أن نسبة البلازما قليلة على الأرض إلا أن معظم الكون (99%) هو في حالة بلازما [6]، 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 وبالتالي فهي حالة غير مستقرة للمادة، لذلك فإن قوة التجاذب الكهربائية تعمل على إعادة اتحاد الشحنات الموجبة والسالبة مع بعضها البعض، وتكون نتيجة إعادة الاتحاد هي انطلاق ضوء ذو تردد معين (طيف) يعتمد على سويات طاقة الذرات المكونة لمادة البلازما.

تبلغ طاقة الفوتون الصادر في النبضة الليزرية $E_{\text{photon}} = 28.60 \times 10^{-20} J = 1.79 eV$ وهي بشكل عام أقل من طاقة تشتت الذرات والجزيئات (طاقة التشتت الوسطية بحدود $10 eV$)، لكن طاقة النبضة الليزرية الواحدة $E = 280 mJ$ تحتوي على 9.79×10^{17} فوتون، وبالتالي فإن توليد البلازما هو أسلوب متعدد الفوتونات [7].

بنتيجة عملية الامتصاص المتعددة الفوتونات الموجهة على نقطة معينة من الهدف يحدث تسخين محلي على السطح وتتبخّر مادة الهدف، حيث تتشكل الإلكترونات الأولية (والأيونات الأولية) وفي الوقت نفسه يحدث امتصاص كبير للفوتونات معاً أو تتابعياً بسبب التأين. تمتص الإلكترونات الحرة الطاقة الضوئية للنبضة الليزرية عن طريق إشعاع الكبح العكسي وبالتالي تتسارع الإلكترونات وتتصادم مع ذرة معتدلة ومع فوتون، والنتيجة هي كل إلكترون حر يكتسب طاقة الفوتون وبالتالي يزيد من طاقته الحركية. عندما تبلغ طاقة الإلكترونات المتسارعة طاقة التأين، تتصادم مع الذرات المعتدلة مسببة تشتت الذرات وبالتالي يتم الحصول على إلكترونات طاقتها منخفضة تساهم في عمليتي الامتصاص والتسارع، وبهذا الشكل يحدث تشتت الغاز مكوناً البلازما. وكي تكون حزمة الليزر قادرة على الولوج في البلازما يجب أن يكون تردد شعاع الليزر $\nu_L = 4.32 \times 10^{14} s^{-1}$ أكبر من تردد اهتزازات البلازما ν_p ، حيث $\nu_p = 9 \times 10^3 \sqrt{N_e}$ و N_e تركيز الإلكترونات مأخوذاً في cm^3 ، وبالتالي فإن:

$$\nu_L > \nu_p \Rightarrow 4.32 \times 10^{14} s^{-1} > 9 \times 10^3 \sqrt{N_e} s^{-1}$$

$$18.6624 \times 10^{28} > 81 \times 10^6 N_e \quad \text{أو:}$$

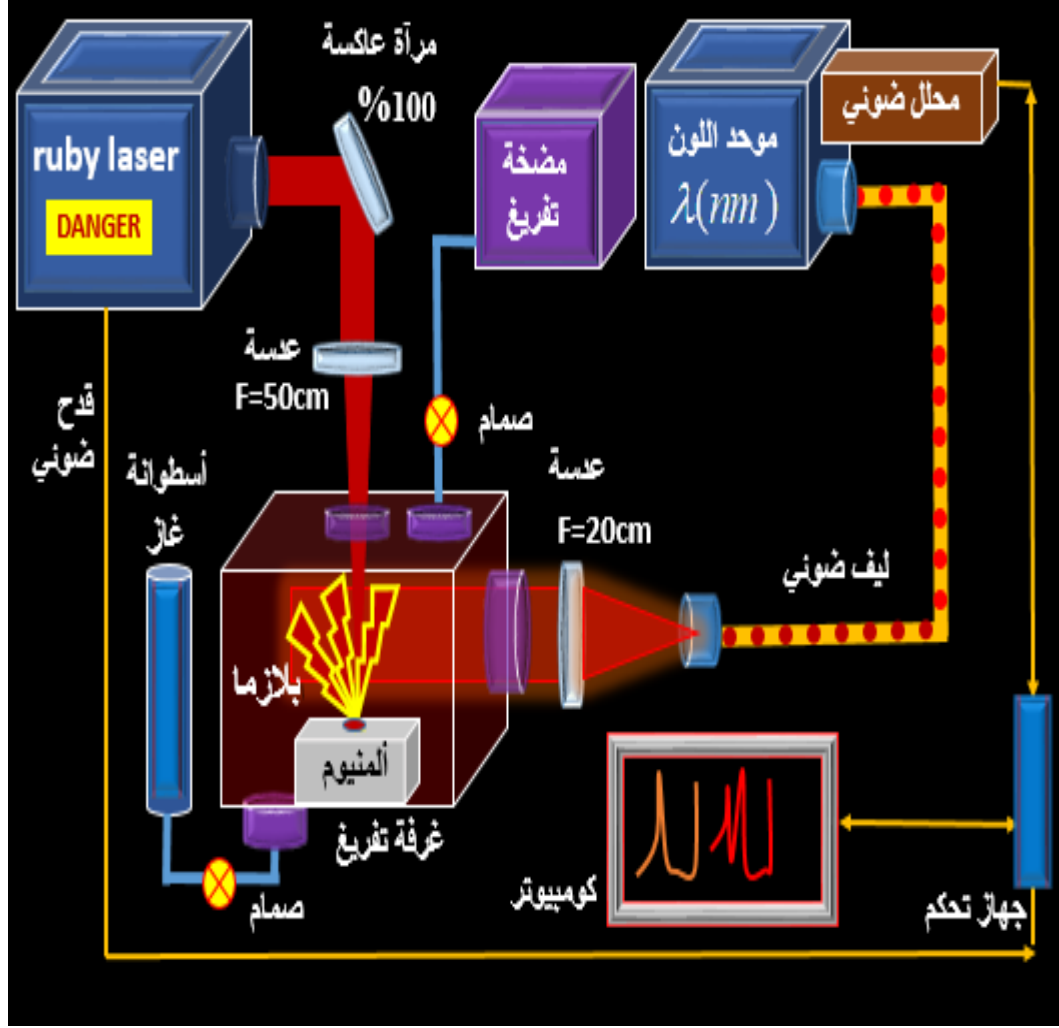
$$N_e < 23 \times 10^{20} cm^{-3} \quad \text{ومنه:}$$

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

3- الأجهزة والأدوات:

تستخدم في هذا البحث أجهزة حديثة ذات تقنية عالية كما في الشكل (5)، ونذكر فيما يلي أهمها:

- جهاز الليزر: تم استخدام الليزر الياقوتي النبضي عالي الطاقة الذي طول موجته $\lambda = 694.3 nm$.
- غرفة التفريغ: وهي عبارة عن غرفة على شكل مكعب طول حرفه $25 cm$ مصنوعة من مادة (STANLESS STEEL)، مجهزة بفتحات جانبية وعلوية تُغلق بإحكام بقطع من الكوارتز عالي الشفافية تسمح بمرور نبضات الليزر والغاز ومراقبة البلازما المتولدة. وتتصل مباشرة مع مضخة التفريغ.
- العينة الألمنيوم (الهدف): يعتبر الألمنيوم Al الذي عدده الذري 13 من أكثر المعادن فعالية كيميائية كمعدن حر، ولذلك نجده مرتبطاً بأكثر من 270 معدن مختلف. المصدر الرئيس للألمنيوم هو معدن البوكسيت. يمتاز الألمنيوم بمقاومته للتآكل وبخفة وزنه حيث يدخل في صناعة الطائرات.
- بالإضافة لأجهزة قياس أخرى وهي: مضخة التفريغ، موحد اللون، المحلل الضوئي، جهاز كومبيوتر، جهاز تحكم، ألياف ضوئية، اسطوانات غاز، جهاز قياس طاقة النبضة الليزرية، أجهزة قياس نقاوة العينة وكثافتها وصلتها.



الشكل (5): الأجهزة العملية المستخدمة في توليد البلازما.

النتائج والمناقشة:

من المعروف أن طاقة النبضة الليزرية تتناقص مع الزمن نتيجة استخدام جهاز الليزر، وبالتالي يجب قياسها بدقة قبل البدء بالخطوات العملية، هذا يعني أن كثافة استطاعة النبضة الليزرية تتناقص أيضاً مع الزمن [8]. لذلك تمّ قياس طاقة النبضة الليزرية عملياً، حيث كانت تساوي: $E = 280mJ$. وبناءً على ذلك تمّ حساب وسطاء الليزر الياقوتي النبضي كما يلي:

• طول موجة النبضة الليزرية: $\lambda = 694.3nm$.

• تواتر (تردد) النبضة الليزرية:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}}{694.3nm} = \frac{3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}}{694.3 \times 10^{-9} m} = 0.00432 \times 10^{17} s^{-1}$$

$$\Rightarrow \nu = 4.32 \times 10^{14} s^{-1} = 432THz$$

• طاقة الفوتون الواحد في النبضة الليزرية:

$$\begin{aligned} E_{\text{photon}} &= h\nu = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s} \times 4.32 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \\ &= 28.598 \times 10^{-20} \text{ J} = 28.60 \times 10^{-20} \text{ J} \\ &= \frac{28.60 \times 10^{-20}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 17.88 \times 10^{-1} \text{ eV} \\ &= 1.79 \text{ eV} \end{aligned}$$

• عدد الفوتونات الموجودة في النبضة: $N = \frac{E}{E_{\text{photon}}} = \frac{280 \times 10^{-3} \text{ J}}{28.6 \times 10^{-20} \text{ J}} = 9.79 \times 10^{17} \text{ photons}$

• زمن استمرار النبضة الليزرية: $t = 10 \text{ ns}$

• استطاعة النبضة الليزرية: $P = \frac{E}{t} = \frac{280 \times 10^{-3} \text{ J}}{10 \times 10^{-9} \text{ s}} = 28 \times 10^6 \text{ W} = 28 \text{ MW}$

• قطر النبضة الليزرية: $d = 2 \text{ mm} \Rightarrow R = \frac{d}{2} = 1 \text{ mm} = 0.1 \text{ cm}$

• مساحة مقطع النبضة الليزرية:

$$\begin{aligned} S &= \pi R^2 = 3.14 \times (0.1 \text{ cm})^2 = 0.0314 \text{ cm}^2 \\ &= 0.0314 \times (10^{-2} \text{ m})^2 = 0.0314 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

• شدة (كثافة استطاعة) النبضة الليزرية:

$$\begin{aligned} W &= \frac{P}{S} = \frac{28 \text{ MW}}{0.0314 \text{ cm}^2} = 891.7 \text{ MW.cm}^{-2} \\ &= \frac{28 \times 10^6 \text{ W}}{0.0314 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 891.7 \times 10^{10} \text{ W.m}^{-2} \end{aligned}$$

❖ العلاقة بين شدة (كثافة استطاعة) النبضة الليزرية I وشدة الحقل الكهربائي E_0 :

تُعطى كثافة تدفق الطاقة الإشعاعية \vec{S} في النظام الدولي SI بدلالة متجه الحقل الكهربائي \vec{E} والحقل المغناطيسي \vec{H} بالعلاقة التالية: $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ وبالإستفادة من العلاقة $\epsilon \epsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2$ وبفرض $\epsilon = \mu = 1$ ولدنيا [9].

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{A.s}}{\text{V.m}}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{V.s}}{\text{A.m}}$$

لذلك نجد:

$$E_0 = \sqrt{2I \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} \quad (1)$$

$$H_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_0 \quad (2)$$

مع ملاحظة أن:

$$\begin{aligned}
[E_0]_{SI} &= \sqrt{[I]_{SI} \sqrt{\frac{[\mu_0]_{SI}}{[\epsilon_0]_{SI}}}} = \sqrt{\frac{W}{m^2} \sqrt{\frac{\frac{V \cdot s}{A \cdot m}}{\frac{A \cdot s}{V \cdot m}}}} = \sqrt{\frac{W}{m^2} \sqrt{\frac{V^2}{A^2}}} = \sqrt{\frac{W}{m^2} \cdot \frac{V}{A}} \\
&= \sqrt{\frac{J}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{V}{A}} = \sqrt{\frac{C \cdot V}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{V}{A}} = \sqrt{\frac{A \cdot s \cdot V}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{V}{A}} = \sqrt{\frac{V^2}{m^2}} = \frac{V}{m}
\end{aligned}$$

وبالتعويض في العلاقة (1) نجد:

$$E_0 \approx 27.46\sqrt{I} \quad (3)$$

وبما أن: $I = 891.7 \times 10^{10} W \cdot m^{-2}$ وبالتالي

$$\begin{aligned}
E_0 &= 27.46\sqrt{891.7 \times 10^{10}} V \cdot m^{-1} \\
&= 819.99 \times 10^5 V \cdot m^{-1} \\
&= 820 \times 10^5 V \cdot m^{-1} = 82 \times 10^6 V \cdot m^{-1} \\
&= 82 \times 10^4 V \cdot cm^{-1}
\end{aligned}$$

لقد تمَّ قياس تركيز الإلكترونات N_e كتابع لكثافة الطاقة الإشعاعية للنبضة الليزرية، أي: $N_e = f(W)$ ، وذلك اعتماداً على برنامج القياس المجهز به الكومبيوتر، حيث يعطي هذا البرنامج تركيز الإلكترونات لحظة إطلاق النبضة الليزرية. ومن ثمَّ تمَّ حساب وسطاء التعرض ω للخطوط الطيفية للبلازما الناتجة اعتماداً على العلاقة التالية: $\Delta\lambda_\omega = \omega \left(\frac{N_e}{10^{17}} \right)$ ، حيث $\Delta\lambda_\omega$ نصف عرض الخط الطيفي الناتج عند منتصف طوله ويتم قياسه مباشرة من الطيف الناتج، و N_e تركيز الإلكترونات [10].

$$\omega = \Delta\lambda_\omega \left(\frac{10^{17}}{N_e} \right) \quad (4)$$

ومن أجل جميع الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما الناتجة، تمَّ قياس $\Delta\lambda_\omega$ ، حيث $2\Delta\lambda_\omega = \frac{1}{5} nm \Rightarrow \Delta\lambda_\omega = \frac{1}{10} nm = 0.1 nm$ ، ومن الملاحظ أن قيم وسطاء التعرض للخطوط الطيفية تتناقص كلما ازداد تركيز الإلكترونات N_e ، أي كلما ازدادت كثافة استطاعة النبضة الليزرية W ، وهذا يعني أن الخطوط الطيفية تزداد حدة وشدة، يمكن حساب وسطاء التعرض ω من أجل الحالة التالية المبينة في الجدول أدناه:

$R(mm)$	1
$W(MW \cdot cm^{-2})$	891.7
$N_e(cm^{-3})$	431×10^{17}
$\omega(\text{Å})$	0.002

كما يلي اعتماداً على العلاقة (4):

$$\omega = \Delta\lambda_{\omega} \left(\frac{10^{17}}{N_e} \right) = 0.1nm \left(\frac{10^{17} cm^{-3}}{431 \times 10^{17} cm^{-3}} \right) = 0.0002nm = 0.002 \text{ \AA}$$

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

$R(mm)$	1	2	3	4
$W(MW.cm^{-2})$	891.7	222.9	99	55.7
$N_e(cm^{-3})$	431×10^{17}	107.75×10^{17}	26.94×10^{17}	6.74×10^{17}
$\omega(\text{\AA})$	0.002	0.009	0.037	0.148

لقد تم استخدام عدسة مجمعة ($F = 45cm$)، مهمتها تجميع النبضة الليزرية عند السطح المصقول للعينية Al ، بحيث يكون نصف قطر أثر النبضة الليزرية عند ذلك السطح يساوي $R = 1mm$ ، وفي هذه الحالة الموافقة لكثافة استطاعة النبضة الليزرية $W = 891.7 MW cm^{-2}$ ، وُجد أن الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما الناتجة في أجواء مختلفة من الغازات توافق الأطوال الموجية المرتبة في الجدول (2)، التالي:

الجدول (2): طول موجة الخطوط الطيفية الأساسية للبلازما المتولدة عن مادة الألمنيوم.

الغاز	Ne	N_2	Ar
الشدة (وحدة اختيارية)	7.1	7.1	7.1
$R(mm)$	1	1	1
$\lambda(nm)$	266.5	266.1	265.7

حيث نلاحظ أن شدة الخطوط الطيفية تبقى ثابتة وتساوي 7.1 وحدة اختيارية، لكنه يطرأ انزياح على الخطوط الطيفية مقداره $\Delta\lambda_{N_2} = 266.5nm - 266.1 = 0.4nm$ ، $\Delta\lambda_{Ar} = 266.5nm - 265.7 = 0.8nm$ ، وذلك بالنسبة للخط الطيفي المتولد في حالة غاز النيون Ne .

أعطى القياس المباشر لدرجة حرارة البلازما المتولدة، قيم تتراوح بين ($10800K - 10825K$)، وذلك من أجل الخطوط الطيفية الرئيسية واستطاعة النبضة الليزرية $W = 891.7 MW .cm^{-2}$ ، ولوُحظ أنها تتغير بتغير الجو الغازي المحيط بمادة الهدف Al وتفسير ذلك كما يلي: ترتبط درجة الحرارة المطلقة T للغاز بكتلته الجزيئية الغرامية μ بالعلاقة التالية $T = \alpha\mu$ ، حيث α مقدار ثابت يتعلق بضغط وكثافة الغاز، وبالتالي عند تغير الغاز تتغير μ ، وعند ازديادها تزداد درجة حرارة الغاز T ، مما يؤدي إلى انزياح الخطوط الطيفية للبلازما نحو أطوال موجية أقصر، وهذا يعني أن الخطوط الطيفية تنزاح في الغازات كلما ازدادت قيم الكتل المولية μ ، [11].

إن تناقص تركيز ودرجة الحرارة 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 .

وبالاستفادة من العلاقة التي تربط طول موجة الخط الطيفي λ للبلازما بدرجة حرارتها المطلقة التالية T :

$$T \lambda = 2.88 \times 10^{-3} mK$$

فمن أجل الخط الطيفي الذي طول موجته $\lambda = 266.5 nm$ ، يمكن حساب درجة الحرارة T كما يلي:

$$T = \frac{2.88 \times 10^{-3} mK}{\lambda} = \frac{2.88 \times 10^{-3} mK}{266.5 nm} = \frac{2.88 \times 10^{-3} mK}{266.5 \times 10^{-9} m} = 10807 K$$

وبذلك يمكن حساب درجات حرارة البلازما الناتجة والتي توافقت تماماً مع النتائج التجريبية [12].

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

الجدول (3): انزياح الخطوط الطيفية لبلازما الألمنيوم Al بتغير الغاز المحيط بالهدف وذلك تحت ضغط ثابت $P = 1 mbar$.

الغاز	الشدة وحدة اختيارية	$\lambda (nm)$	$\Delta \lambda (nm)$	$T (K)$	$FW (g.mol^{-1})$
Ne	7.1	266.5	0	10807	18.20
N_2	7.1	266.1	0.4	10823	28
Ar	7.1	265.7	0.8	10840	95.39

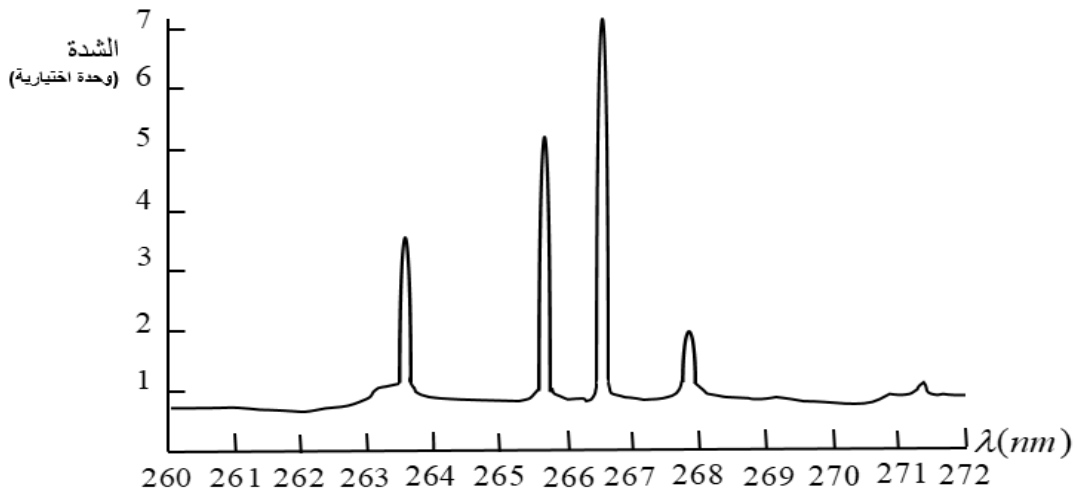
الجدول (4): تغير طول موجة البلازما ودرجة حرارتها بتغير كثافة استطاعة

النبضة الليزرية W والجو الغازي تحت ضغط ثابت $P = 1 mbar$.

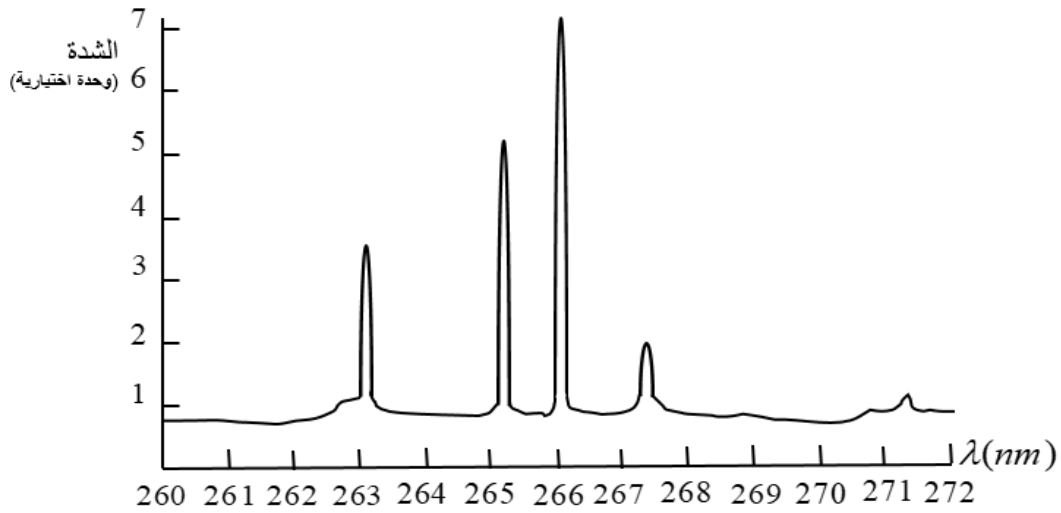
الغاز	الشدة	$R (mm)$	$W (MW .cm^{-2})$	$T (K)$	$\lambda (nm)$
Ne	7.1	1	891.7	10807	266.5
	5.1	2	222.9	10195	282.5
	3.3	3	99	9536.4	302
N_2	7.1	1	891.7	10823	266.1
	5.1	2	222.9	10209	282.1
	3.3	3	99	9549	301.6
Ar	7.1	1	891.7	10839	265.7
	5.1	2	222.9	10224	281.7
	3.3	3	99	9562	301.2

إن الخطوط الطيفية لبلازما الألمنيوم Al المتولدة بواسطة شعاع الليزر، وفي أجواء غازية مختلفة ودرجات

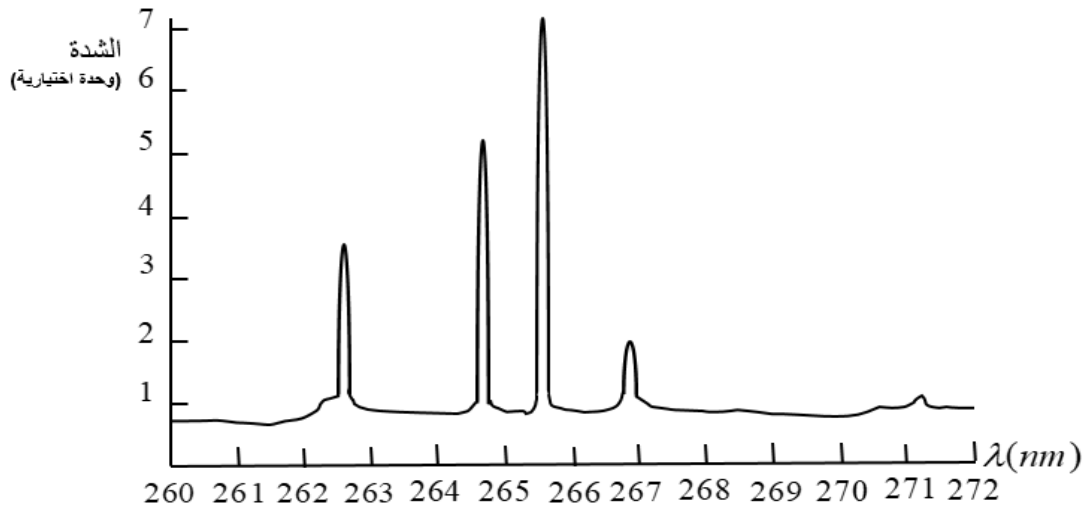
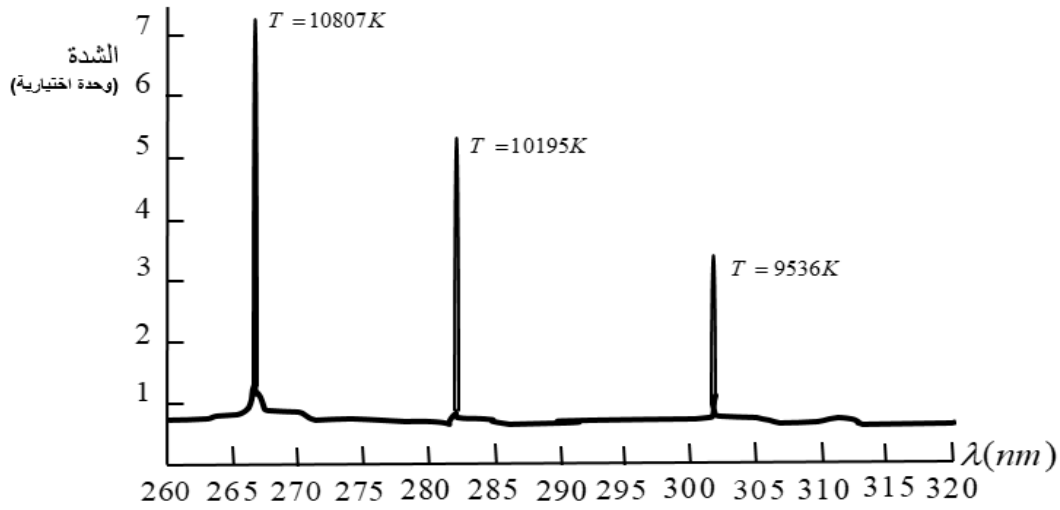
حرارة مختلفة، موضحة في الأشكال المرفقة بدءاً من الشكل (6) وحتى الشكل (11).

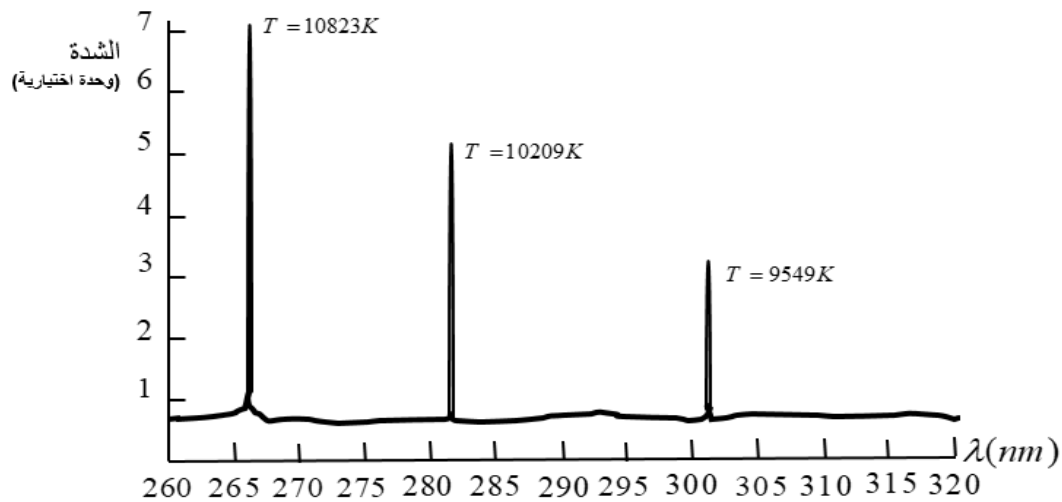


الشكل (6): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز النيون Ne .

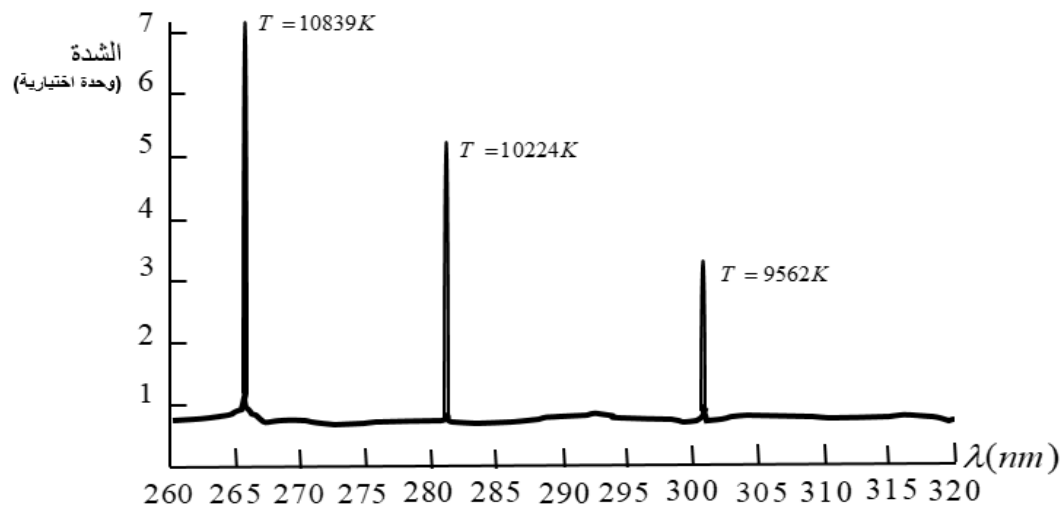


الشكل (7): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز النتروجين N_2 .

الشكل (8): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز الأرجون Ar .الشكل (9): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز النيون Ne كتابع لدرجة حرارة البلازما.



الشكل (10): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز النيتروجين N_2 كتابع لدرجة حرارة البلازما.



الشكل (11): التوزيع الطيفي لبلازما الألمنيوم في جو غاز الأرجون Ar كتابع لدرجة حرارة البلازما.

نشير إلى أن الارتياح النسبي في الأجهزة المستخدمة هو 0.1% ، أما بالنسبة لبقية الوسطاء الأخرى يُحسب رياضياً كما يلي:

- الارتياح في شدة (كثافة استطاعة) النبضة الليزرية.

$$\frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = 0.1\% \Rightarrow \frac{\Delta I}{I} = 10^{-3} \Rightarrow \Delta I = 10^{-3} \times I = 10^{-3} \times 891.7 \times 10^{10} W \cdot m^{-2} \Rightarrow$$

$$\Delta I = 0.90 \times 10^{10} W \cdot m^{-2} \Rightarrow$$

$$I_0 = I \pm \Delta I = (891.7 \pm 0.90) \times 10^{10} W \cdot m^{-2}$$

- الارتياح في شدة الحقل الكهربائي E .

$$E_0 \approx 27.46\sqrt{I} \quad \text{ننطلق من العلاقة:}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta E_0}{E_0} = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{2} \times 10^{-3} = 0.5 \times 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Delta E_0 = 0.5 \times 10^{-3} E_0 = 0.5 \times 10^{-3} \times 82 \times 10^6 V \cdot m^{-1} = 0.041 \times 10^6 V \cdot m^{-1} \Rightarrow$$

$$E_{00} = E_0 \pm \Delta E_0 = (82 \pm 0.041) \times 10^6 V \cdot m^{-1}$$

- الارتياح في طول الموجة λ .

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \times 100\% = 0.1\% \Rightarrow \Delta \lambda = 10^{-3} \lambda$$

- الارتياح في درجة الحرارة T .

$$T \lambda = 2.88 \times 10^{-3} mK$$

ننتقل من العلاقة:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 10^{-3} \Rightarrow \Delta T = 10^{-3} T$$

وبالتالي:

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تتناسب طاقة النبضة الليزرية طردياً مع زيادة عدد القواطع الناقصة المكونة لجملة العاكس والواضع، حيث تتضاعف طاقة الليزر مرات مع الإبقاء على مكوناته الأخرى ثابتة.
- 2- فترة حياة سويات الطاقة E_2 طويلة جداً $\tau = 3 \times 10^{-3} s$ في مجال الحديث عن فترة حياة مستويات طاقة الذرة، لذلك تتجمع الذرات لمدة طويلة في عصابة المستويات E_2 ويصبح عندنا انعكاس كبير جداً للأهلية بين E_2 وبين المستوي الأساسي مما يسمح للانبعاث القسري بأن يعطي أشعة ليزر قوية جداً.
- 3- تتناقص كثافة الطاقة الإشعاعية للنبضة الليزرية ضمن حدود الارتياح المطلق المرتكب في القياس.
- 4- تحدث البلازما في اتجاه حزمة الليزر وفي جميع الأوساط الغازية.
- 5- تتعلق صفات إشعاع البلازما بتركيز الإلكترونات ودرجة الحرارة المرافقة لها، وبالتالي تتعلق بكثافة استطاعة الليزر.
- 6- يبقى للخطوط الطيفية لبلازما الألمنيوم الشدة نفسها عند تغيير الجو الغازي المحيط بالهدف، لكنها تنزاح نحو أطوال موجية أقصر من أجل الغازات المدروسة ($\Delta \lambda_{N_2} = 0.4nm$ و $\Delta \lambda_{Ar} = 0.8nm$)، وتزداد درجة حرارة البلازما المطلقة، وهذا يعني أن الخطوط الطيفية تنزاح باتجاه الغازات ذوات الكتل المولية μ الأكبر.
- 7- عند زيادة كثافة استطاعة النبضة الليزرية تزداد درجة حرارة البلازما وكثافة الإلكترونات فيها، وبالتالي تنزاح الخطوط الطيفية للبلازما نحو أطوال موجية أقصر، مما يؤدي إلى تغيير لون البلازما، وتغيير لون الهدف.
- 8- تتناقص وسطاء التعرض ω للخطوط الطيفية كلما ازداد تركيز الإلكترونات N_e ، أي كلما ازدادت كثافة استطاعة النبضة الليزرية W .
- 9- من خلال دراسة أطيف البلازما المتولدة عن هدف معين، يمكن التعرف أكثر على الخواص الفيزيائية لهذا الهدف، كتحديد درجة الحرارة المطلقة T اللازمة لتشكيل البلازما وعلاقة درجة الحرارة هذه بكثافة استطاعة النبضة الليزرية W وبطول موجتها λ .
- 10- لقد فتحت هذه الدراسة أفقاً جديدة لتطبيقات الليزر في مجال الفيزياء، وبالتالي نوصي بمتابعتها من أجل أهداف جديدة ومختلفة، وذلك لتحديد الثوابت الفيزيائية المتعلقة بأطيف البلازما المتولدة بالليزر عن هذه الأهداف.

المراجع:

1. A. L. Schawlow, *Advances in Quantum Electronics*, J. R. Singer, New York, London 1999 (str. 51).
2. BLASZCZAK, Z. J., GAUDEN, P. G. *Plasma Production by Laser*, Poznan, 2010, 583.
3. KACZMAREK, F. M. *Wstep do Fiziki Laserow*, WNT, Warszawa, 2009, 768.
4. KACZMAREK, *Podstawy dzialania Laserow*, Warszawa 1998.
5. MULSER, P. J., SIEGEL, R. G., WITKOWSKI, S. M. *Physics Reports*, Warszawa, 2013, 772.
6. N. B. Basow, O. N. Krochin, W. G. Szklyzkow, *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, tom 2, (red.) H. Schwarz, H. Hora, Plenum Press, New York 2009 (str. 389).
7. S. Kaliski, I in., *Theory and Experiment of Plasma-Focus-Laser System*. Referat na VIII Konferencji pt. *Laser-Plasma-Fusion*, Rynia pod Warszawa, maj 2014.
8. KALISKI, S. T., DENUS, S. N., JANKIEWICZ, Z. R. *Elektronika Optyka Nieliniowa*, Poznan, 2004, 367.
9. BLASZCZAK, Z. J., *Lasery-Synteza Jadrowa*, Poznan, 2004, 203.
10. ZIMMER, L., TACHIBANA, S. *Laser induced plasma spectroscopy for local equivalence ratio measurements in an oscillating combustion environment*. Elsevier Japan, Vol. 182, N°852, 2011, 1-8.
- 11- S. Kaliski, *Lasery-synteza, jadrowa*, Wiedza Powszechnia, Warsyawa 2005.
- 12- W. W. Korobkin, R. V. Serow, *Pisma w Redakcju, Zurn. Eksp. Tior. Fiz.*, 4, 103 (2009).