

التحليل الحراري ثنائي البعد لخرج ليزر He - Ne وطرائق تبريده

الدكتور ابراهيم بلال*

الدكتور وسام بشير**

وسيم الدوه جي***

(تاريخ الإيداع 7 / 7 / 2014. قُبِلَ للنشر في 15 / 9 / 2014)

□ ملخص □

تحتاج الليزرات لضمان استقرار عملها مع الزمن وثبات مواصفات حزماتها وكفاءتها إلى تبريد المادة الفعالة والعناصر الضوئية الحساسة الملحقة، ويتم اختيار طريقة التبريد المناسبة من الناحية الاقتصادية ومن ناحية سهولة العمل .

تساعد تقنية التبريد في إطالة حياة منابع الضوئية والجمال الليزرية وفي رفع مستوى استقرارها وحسن تشغيلها، لذلك فإن جملة التبريد الكفوءة لليزرات العلمية والصناعية أساسية عند تصميم الليزر، وهي تساعد في تحسين مواصفات الحزمة الصادرة عن الليزرات الغازية أو الصلبة أو نصف الناقلة ، إضافةً إلى أثرها الجيد في عمر الليزر وأمان استخدامه.

تصمم منظومة التبريد التي تحتاجها جملة ليزرية بناءً على كمية الحرارة المتولدة من الجملة (بوحدة J) ، التي يجب على منظومة التبريد إزاحتها لإبقاء الليزر عند درجة حرارة معينة.

الكلمات المفتاحية: ليزر الهليوم نيون، تبريد الليزر، التصوير الحراري، خرج الليزر، أمثلة تشغيل الليزر ، آلة تصوير (كاميرا) CCD ، آلة تصوير حرارية .

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

** مدرس - قسم الفيزياء - جامعة دمشق - المعهد العالي لعلوم الليزر وتطبيقاته - دمشق - سورية .

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

Two dimensional thermal analysis of a He – Ne laser's output and methods of cooling

Dr. Ibrahim belal^{*}
Dr. Wesam basher^{**}
Wasim aldawaji^{***}

(Received 7 / 7 / 2014. Accepted 15 / 9 /2014)

□ ABSTRACT □

we seek to ensure laser stability , during its work , with time , and consistency of specifications and efficiency (returns), the cooling of the active medium and optical elements, are sensitive to the proper cooling method, in economic terms and in terms ease of work.

Cooling technique helps prolonging the life of laser systems ,its stability and optimizing its operation. So the total cooling efficient lasers , Scientific and Industrial is essential when designing a laser and helps improving the specifications of lasers , gaseous or solid or semiconductor . In addition to that cooling has a good impact on the age of the laser , and safety of its use .

The designed cooling system , necessary for a certain laser system , depends on the amount of heat generated from the system(in Joule), which must be removed by the cooling system to keep the laser at specific temperature

Key words: Laser He-Ne, Laser cooling, Thermal Imaging ,Out put laser, laser optimization, CCD camera, Thermal camera.

^{*}Professor , Department of physics, faculty of sciences, Tishreen university, Lattakia, Syria.

^{**}Assistant professor, Department of physics, Damascus university, Higher Institute for Laser Science and Applications. Damascus. Syria.

^{***}postgraduate student , Department of physics, faculty of sciences, Tishreen university, Lattakia, Syria.

مقدمة:

الليزر منبع ضوئي غير تقليدي لا يعمل كباقي المنظومات الإلكترونية النشطة (الأنابيب المخلاة، الترانزستورات) نتيجة تفاعلات متبادلة بين حقول كهربائية مطبقة وشحنات متحركة (إلكترونات) ، بل هو تضخيم الضوء بواسطة الإصدار القسري (المحثوث) للإشعاع . تُبنى نظرية الليزر بشكل موجز على تفاعل المادة مع الحقل الكهرومغناطيسي الذي يُدرس وفق وجهات نظر مختلفة شبيهة تقليدية أو كمومية أو كمومية إحصائية. ويتوقف البناء البسيط لليزر على اعتبار أن الجملة الذرية كممة والحقل تقليدي يُدرس وفق معادلات مكسويل.

يتطلب الحصول على التضخيم اتباع طرائق معينة هي : الضخ الضوئي كما في ليزرات الأجسام الصلبة، أو الضخ الكهربائي كما في ليزرات الغاز بمختلف أنواعها، أو الضخ الكيميائي كما في ليزرات فلور الهيدروجين HF، أو الضخ بحقن الحاملات كما في ليزرات أنصاف النواقل [1] ، [2] .

تتحول الطاقة الفائضة عن عملية الضخ إلى حرارة ، وفي هذه الحالة يجب سحب الحرارة الفائضة من خرج الليزر بمنظومات التبريد المناسبة قبل أن تتحول الحرارة إلى مصدر طاقي مضر بعناصر خرج الليزر من جهود (منابع) حرارية وميكانيكية واختلاف معاملات التمدد الحراري للعناصر المختلفة، وتؤثر الحرارة الفائضة في الحزمة من حيث ازدياد العرض الطيفي لليزر الناتج ، وإثارة مكونات المادة الفعالة بطريقة غير مرغوبة ، ونجد أن طريقة التبريد تتناسب مع عاملين هامين:

1 - طريقة ضخ الطاقة (كهربائية - ضوئية - كيميائية - إلخ).

2 - كثافة التيار الحراري الفائض الواجب إزالته.

ويتم عادة التبريد بالماء أو الهواء أو العناصر الإلكترونية الحديثة، حيث تكون قدرة التبريد للماء أعلى من أي مادة أخرى، ولكن أدوات التبريد بالماء أكثرها تعقيداً وكلفة، لذلك سيهتم هذا البحث بعملية تبريد الليزر بأساليب مختلفة لتقدير جودة الطرائق المختلفة، واختيار المناسب منها من مواصفات معينة لعمل الليزر وحزمته الليزرية، ويهتم العمل بتبريد الليزرات الغازية، وليزر He-Ne بشكل خاص .

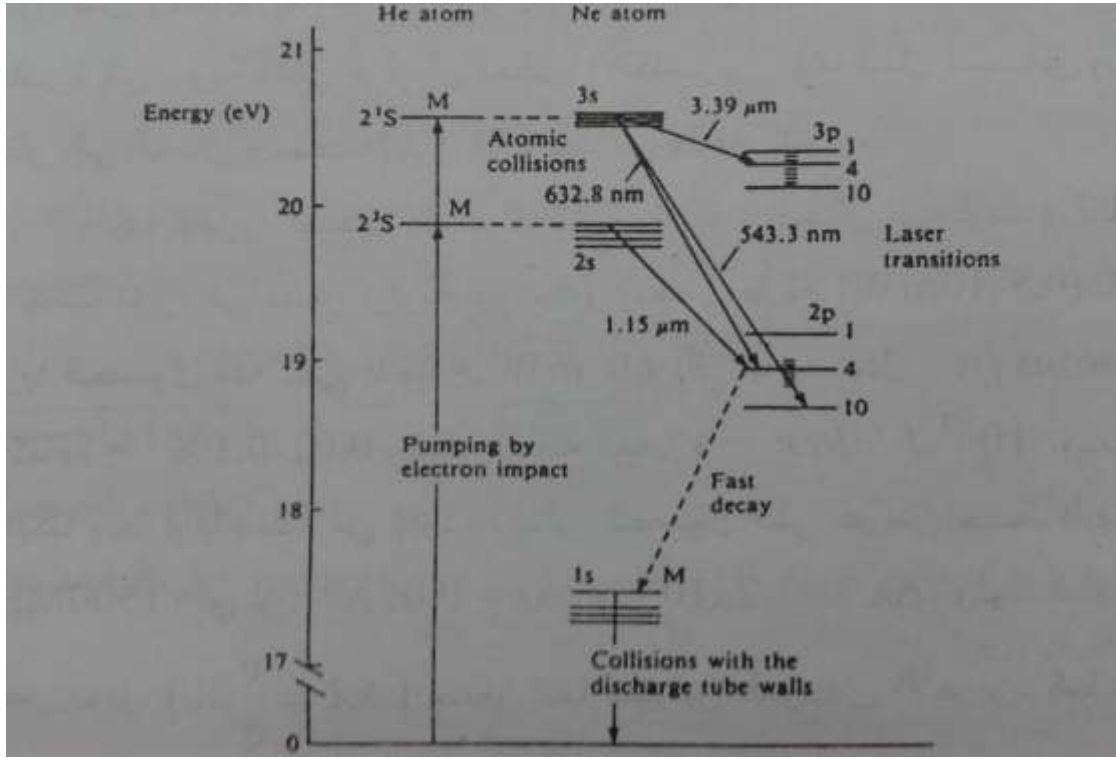
أهمية البحث وأهدافه :

يبين هذا البحث أهمية الجهود الحرارية المطبقة على خرج الليزر، وتغيرات هذه الجهود في أثناء العمل وتأثيرها في الأداء العام لليزر، إذ يمكن للحرارة الزائدة أن تشل وتعطب أي جملة ليزرية ، لذلك كانت الحاجة لتبريد هذه الجمل. ندرس في هذه المقالة الحمولة الحرارية المطبقة على ليزر He-Ne، وتتأبع تغيرها مع زيادة زمن عمل الليزر، وذلك بتبريده بأساليب متعددة واختيار الأنسب، ووصف حالات الحرارة في كل وسيلة تبريد لتقدير الأماكن الأكثر تأثراً بالحمولة الحرارية لليزر والمؤثرة في توزيع الطاقة في حزمة الليزر.

الليزرات الغازية :

إن وسط الريح gain medium في هذه الليزرات هو الغاز . وتُضخ غالبية هذه الليزرات بالانفراغ الكهربائي في أنابيب انفراغ موجبة PCD أو أنابيب انفراغ مجوفة HCD. ويمكن ضخ بعضها بالأمواج الراديوية (RF) أو حتى بالحزم الإلكترونية ، كما تُضخ بعض جمل الليزر الغازية الجزيئية بالفوتونات (ضخ ضوئي) ، ولكن طريقة الضخ الكهربائي هي الأفضل . يتألف وسط الريح لليزر He - Ne من أنبوب زجاجي ضيق (لا يتجاوز قطره عدة mm)، يُملأ بمزيج من غازي He و Ne وتوضع في نهايته نافذتا بروستر. يُثبت المصعد (Anode) بالقرب من إحدى

نهائيتي الأنبوب ، والمهبط (Cathode) بالقرب من النهاية الأخرى التي يتولد منها تيار الانفراغ المستمر الذي تتراوح شدته (10 – 200) mA . ويتراوح ضغط أنبوب الانفراغ بين 1 – 10 torr ونسبة He/Ne 5:1. تثبت في نهاية الأنبوب الليزري مرأتان عاكستان لتؤلف مجاوية F-P الخطية المستقرة ، بحيث تكون عاكسية المرآة الخلفية 100% ، بينما عاكسية مرآة الخرج لا تتجاوز 95% ، بغية إحداث التغذية الضوئية الراجعة الضرورية للتضخيم . تتصادم الإلكترونات الناتجة من الانفراغ مع ذرات He لنُثار إلى سوية عليا شبه مستقرة (2^1S , 2^3S). ولقرب السويات شبه المستقرة في He من سويات Ne ($3S$, $3P$)، ($2S$) تنتقل طاقة ذرات He المثارة إلى ذرات Ne عن طريق التصادم وتعود ذرات النيون المثارة من سويات Ne ($3S$, $2S$) إلى سوية ($3P$)، ($2P$) Ne فتتولد أطوال موجية ليزرية مختلفة لخرج ليزر He – Ne هي : $3.39 \mu m$ و $1.15 \mu m$ و $633 nm$ (انظر الشكل 1) . لكن ما يهمنا هو الانتقال الذي يبدأ من $3S$ وينتهي على $2P$ ويعطي الطول الموجي $633nm$ [3]، [4] ، [5] .



الشكل(1): مخطط السويات الطاقة الرئيسية للهيليوم نيون

طرائق البحث ومواده :

- ليزر He-Ne من النمط JL-7A Type مواصفاته :

طول أنبوب الليزر: 800 mm

طول الموجة: 632.8 nm

طاقة الخرج : $15 \text{ mw} \geq$

تيار العمل : 20 mA

جهد المدخل : 220 v AC ، والتردد 50 Hz

- آلة تصوير (كاميرا) CCD Charged Coupled Device ، تستطيع أخذ عدة صور في الدقيقة لمقطع الحزمة الليزرية (الشكل 2).

- آلة تصوير حرارية لتصوير خرج ليزر He- Ne ومعرفة درجة حرارته الموافقة (الشكل 3).



الشكل (3): آلة التصوير الحرارية



الشكل (2): آلة التصوير CCD

- مقياس حرارة رقمي دقيق.

- مقياس استطاعة رقمي مناسب.

النتائج والمناقشة :

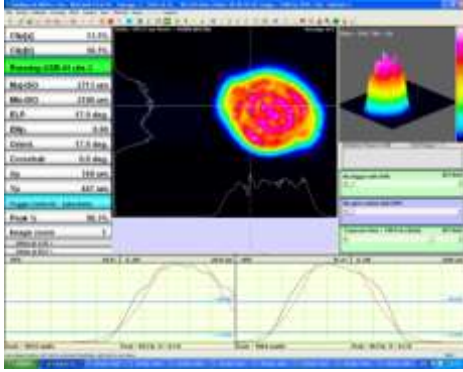
تم تشغيل ليزر He-Ne دون تبريد عند درجة حرارة مخبر تقانة الليزر في المعهد العالي لعلوم الليزر وتطبيقاته في دمشق وكانت تعادل 20°C ، وتم وصل آلة التصوير CCD مع الحاسب المجهز ببرنامج لأخذ صور لمقطع الحزمة الليزرية كل دقيقة. أما آلة التصوير الحرارية فتم وضعها على بعد 20 Cm من فتحة الليزر كما في الشكل (3) . وهذا البعد ثابت في جميع الصور اللاحقة لتصوير خرج الليزر حرارياً كل دقيقة ومعرفة درجة حرارته الموافقة ، وباتباع ما سبق حصلنا على النتائج الموضحة في الجدول (1) :

جدول (1)

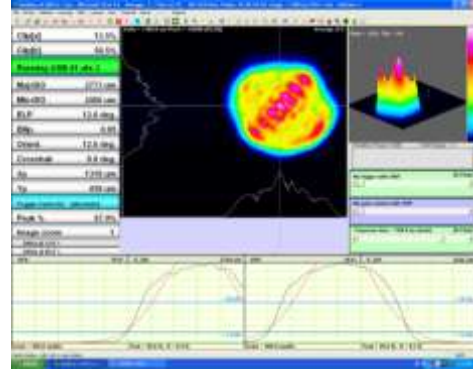
الزمن t (min)	درجة الحرارة T (°C)	الاستطاعة W(mw)
1	23.0	15.0
2	25.0	15.0
3	28.0	14.8
4	30.0	14.8
5	32.0	14.7
6	34.0	14.6
7	36.0	14.5
8	38.0	14.4
9	40.0	14.3
10	42.0	14.1
11	43.0	13.9

13.7	44.0	12
13.5	45.0	13
13.2	46.0	14
13.2	46.0	15

بأخذ صور مقطع الحزمة الليزرية الموافقة لدرجتي الحرارة الأولى 23°C والأخيرة 46°C باستخدام كاميرا CCD نحصل على صور نعرض نموذجاً منها في الشكلين (4) و (5).

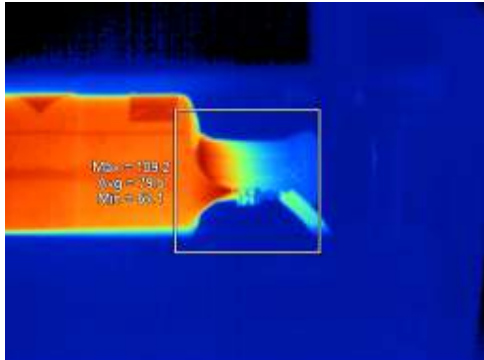


الشكل (5)

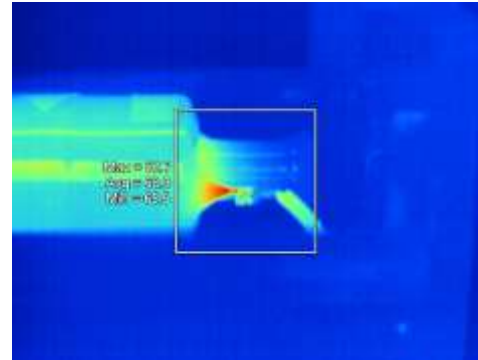


الشكل (4)

نلاحظ في الشكل (4) ، حيث درجة الحرارة 23°C أن شكل مقطع الحزمة جيد ولا يعاني من تشوهات (إن اللون الأحمر يدل على وجود الحرارة وازدياد كثافته تعني ازدياد درجة الحرارة) . بينما نلاحظ في الشكل (5) حيث درجة الحرارة 46°C أن شكل مقطع الحزمة الليزرية يعاني تشوهات كبيرة (اللون الأحمر الكثيف) بالتالي فهو يتغير مع الزمن، وهذا يسبب ارتفاع درجة حرارة خرج الليزر. ويتضح ذلك عند أخذ 15 صورة حرارية لخرج الليزر في كل دقيقة ، كما يظهر في مجموعة من الصور التي نبين منها الصورتين الأولى والأخيرة الموضحتين في الشكلين (6) و (7) .



الشكل (7)



الشكل (6)

ننوه هنا أنه يمكن معرفة درجة حرارة أي نقطة من المربع الموضح في الشكلين السابقين باستخدام برنامج الكاميرا الحرارية ، لكن الصور هذه تعطينا درجة الحرارة العظمى و الوسطى والدنيا بالفهرنهايت (F°)، وللتحويل إلى درجة مئوية (C°) نستخدم العلاقة :

$$C^{\circ} = (F^{\circ} - 32) / (1.8) \quad (1)$$

كما رأينا في الشكلين السابقين؛ يوجد حرارة في الخرج الليزري والمعبر عنه باللون الأحمر في الصور. لذا يُفضل التخلص من هذه الحرارة بتبريد الليزر بوسائل مختلفة كالهواء أو الماء أو المفعول الكهراحراري وفقاً للجملة المدروسة .

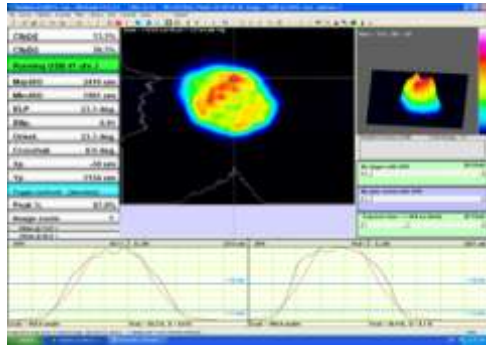
1- التبريد بالهواء أو الغاز : Air or gas cooling

يُستخدم الهواء الموجه لتبريد منظومة الليزر التي لها متوسط قدرة منخفض (عدة mw) وبخاصة في الجمل القابلة للحمل (النقل) ، الذي يتولد نتيجة تطبيق نموذج مصغر لمراوح نافخة نابذة أو محورية أو مراوح مصممة لتبريد الأجهزة الالكترونية . يعتمد جريان الهواء الناتج من مروحة ما على الضغط السكوني الذي تعمل المروحة في مقابله [5] . وتوفر المراوح الصغيرة المستخدمة لتبريد الليزر جريان هواء بقدر من 300-600 liter/min) عند ضغط سكوني 30 torr . وقد حصلنا نتيجة تبريد هذا الليزر بالهواء على النتائج الموضحة في الجدول (2) (انظر أيضاً الجدول 1 لحالة عدم التبريد).

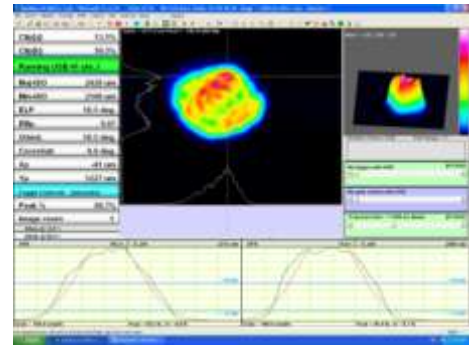
جدول (2)

الزمن t (min)	درجة الحرارة T (°C)	الاستطاعة W (mw)
1	23.0	17.2
2	24.0	17.2
3	26.0	17.0
4	28.0	16.8
5	30.0	16.8
6	32.0	16.6
7	34.0	16.6
8	36.0	16.6
9	37.0	16.4
10	37.6	16.4
11	37.8	16.2
12	38.0	16.2
13	38.2	15.8
14	38.4	15.4
15	38.8	15.4

نلاحظ أن درجة حرارة الليزر عند الدقيقة 15 min هي 38.8 °C، بينما كانت في حالة عدم وجود تبريد 46 °C ، أي أن التبريد ساهم في إزالة كمية الحرارة من خرج الليزر. كما نلاحظ أن استطاعة الليزر تغيرت وأصبحت أكبر مما كانت عليه في حالة عدم وجود تبريد ، وهذا ما نلاحظه في صور مقطع الحزمة الليزرية الموضحة في الشكلين (8) و(9) والموافقة لدرجتي الحرارة الأولى T= 23 °C والأخيرة T= 38.8 °C.

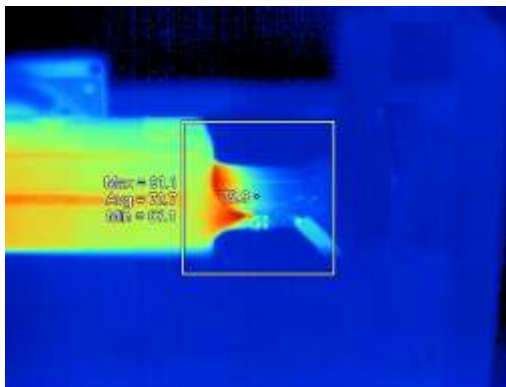


الشكل (9)

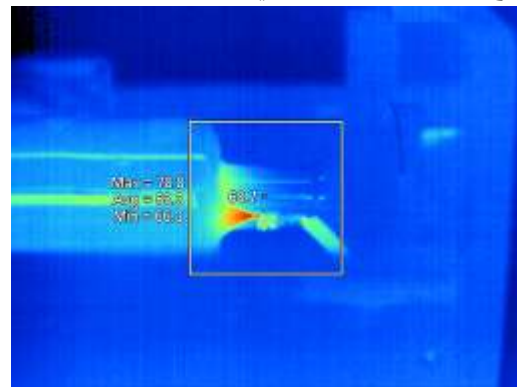


الشكل (8)

كما يظهر من الشكلين السابقين أن التبريد بالهواء قد خفف من أثر الجهود الحرارية مقارنة مع الصور في حالة عدم وجود تبريد فحصلنا على استطاعة جيدة . كما يُبين الشكلان (10) و (11) صور الكاميرا الحرارية الخاصة بخرج الليزر والموافقة لدرجتي الحرارة الأولى والأخيرة المأخوذة .

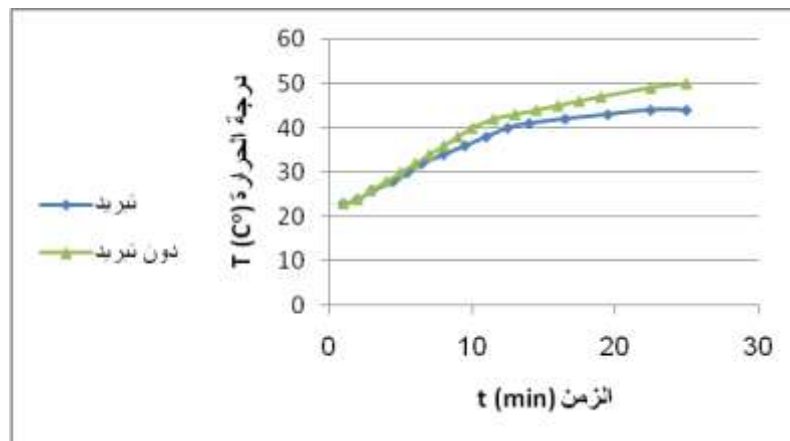


الشكل (11)



الشكل (10)

ويرسم تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن من أجل حالتي عدم التبريد والتبريد حصلنا ، على النتائج الموضحة في الشكل (12) .



الشكل (12)

إن المساحة المحصورة بين المنحنيين تمثل كمية الحرارة الواجب إزالتها من الخرج الليزري في الدقيقة الواحدة للحصول على حزمة ليزرية ذات مواصفات جيدة .

2- التبريد بالسائل : liquid cooling

إن الغرض الرئيس من السائل هو إزالة الحرارة المتولدة في منظومة الليزر (قضيب الليزر ومصدر الضخ وتجويف الليزر) . يقوم المبرد أحياناً بوظائف إضافية ، منها : أن يكون ملائماً لقرائن الانكسار ، وبالتالي إنقاص الانعكاسات الداخلية لأنماط منع الضخ ، أو يكون مرشحاً لإزالة إشعاع الضخ غير المرغوب به. يدفع المبرد- بتأثير الضغط- للجريان فوق سطحي القضيب والمصباح (في حالة ليزر جسم صلب) . أما في حالة ليزر He-Ne فتتوضع هذه العناصر إما داخل أنابيب جريان أو في حجرات تبريد منفصلة عن الجسم الرئيس لليزر، ويكون فرق درجة الحرارة بين الجزء الواجب تبريده والسائل تابعاً لسرعة الجريان ولخصائص تبريد السائل المتدفق. ونظراً لكون الجريان عند سرع منخفضة فإنه يكون منتظماً Laminar .

يعود الانخفاض في درجة الحرارة إلى النقل الأحادي عبر طبقة حدية ثابتة عند السطح البيني للسائل ، ويصبح الجريان مضطرباً عند سرعات أعلى ، مما يقود إلى عملية نقل حراري وانخفاض أكثر في درجة الحرارة . وتعطى الزيادة بدرجة حرارة المبرد الناجمة عن عبور تجويف الليزر بالعلاقة التالية : [6]،[7]

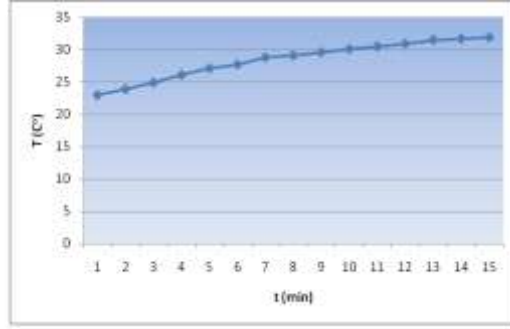
$$\Delta T = Q / (C_p \cdot m) \quad (2)$$

حيث Q كمية الحرارة المنزوعة ، و C_p الحرارة النوعية لمادة التبريد عند ضغط ثابت ، و m معدل الجريان الكتلي. ونتيجة تبريد ليزر He-Ne بالماء عن طريق أنبوب مطاطي حلزوني ملتصق بجدار الأنبوب ، حصلنا على النتائج الموضحة في الجدول (3).

جدول(3)

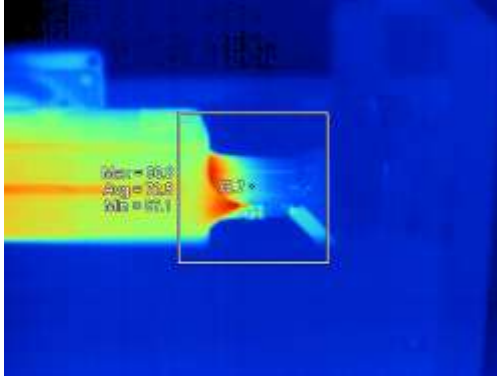
الزمن t (min)	درجة الحرارة T (°C)	الاستطاعة W (mw)
1	23.0	17.0
2	23.9	17.0
3	24.9	17.0
4	26.1	16.8
5	27.1	16.8
6	27.7	16.7
7	28.8	16.6
8	28.9	16.5
9	29.9	16.4
10	30.1	16.4
11	30.5	16.3
12	30.9	16.3
13	31.5	16.2
14	31.7	16.2
15	31.9	16.1

ويرسم تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن ، نحصل على النتائج الموضحة في الشكل (13).

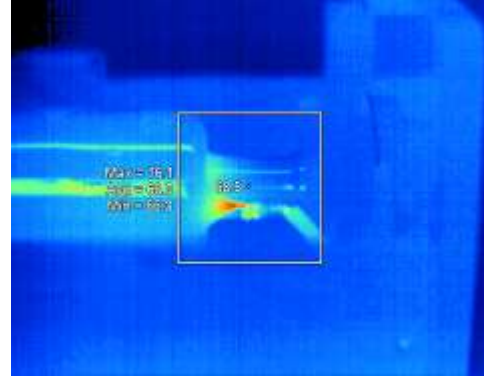


الشكل (13)

وتُوضح الصور الحرارية للخرج الليزري من أجل درجتَي الحرارة الأولى 23 C° والأخيرة 31.9 C° المأخوذة في الشكلين (14) و (15) .



الشكل (15)



الشكل (14)

3- التبريد الكهراحراري - Thermoelectric cooling :

اكتشف العالم بيلتيه عام 1834 أنه عند عكس ظاهرة سيبيك ، أي عند إمرار تيار كهربائي ثابت خلال مزدوج حراري thermocouple مكون من معدنين مختلفين تكون إحدى الوصلتين باردة ، ويمكنها امتصاص الحرارة من الوسط المحيط بها ، بينما الوصلة الأخرى الساخنة يمكنها طرد الحرارة من وإلى الوسط المحيط بها. يحدث امتصاص أو طرد الحرارة عن اختلاف القوة الدافعة الكهربائية an و ap للمادة السالبة والمادة الموجبة على التوالي عند الوصلة . تعرف الحرارة الممتصة أو الحرارة المطرودة بحرارة بيلتيه وتعين بالمعادلة (3) التالية [8 , 9] :

$$Q_p = \beta \cdot i \quad (3)$$

حيث i : شدة التيار الثابت و β معامل بيلتيه ، الذي يعرف بالمعادلة :

$$\beta = (a_p - a_n) \cdot T \quad (4)$$

حيث T : درجة الحرارة المطلقة للوصلة الساخنة أو الباردة .

تتكون وحدة التبريد الكهراحراري من معدنين متصلين ، بعضهما مع بعض . عند إمرار التيار الكهربائي خلال هذه الوحدة يسخن أحد المعدنين بينما يبرد الآخر ، ويكون فرق درجة الحرارة ثابتاً بين المعدنين عند قيمة التيار المارة . غالباً ما تصنع هذه الوحدة على شكل صفيحة بحيث يكون أحد وجهيها مصنوعاً من المعدن الأول ، والوجه الثاني مصنوعاً من المعدن الثاني ، وتكون محاطة بشكل كامل بالخزف Ceramics . يسمى الوجه المكون من المعدن

الساخن بالوجه الساخن The hot side ، بينما يسمى الوجه المقابل بالوجه البارد The cold side . ويمكن تصنيع هذه المبردات بأشكال وأبعاد مختلفة ، كما يظهر في الشكل (16) .



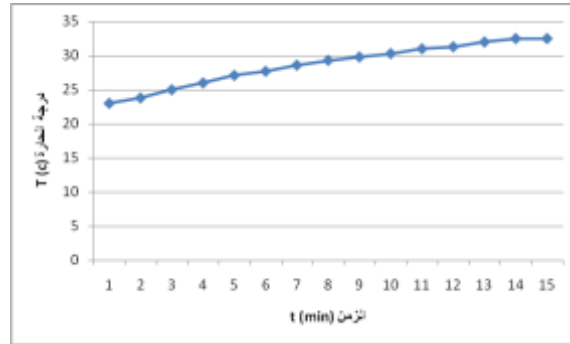
الشكل (16)

عند تبريد ليزر He - Ne باستخدام هذا المفعول حصلنا على النتائج الموضحة في الجدول (4) التالي :

جدول (4)

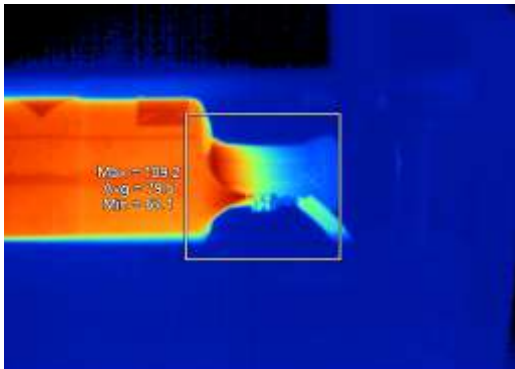
الزمن t (min)	درجة الحرارة T (°C)	الاستطاعة W (w)
1	23.0	17.0
2	23.8	17.0
3	25.0	16.8
4	26.0	16.8
5	27.1	16.5
6	27.7	16.4
7	28.6	16.2
8	29.3	16.2
9	29.8	16.0
10	30.3	16.0
11	31.0	15.8
12	31.3	15.7
13	32.0	15.7
14	32.5	15.6
15	32.8	15.6

و برسم تغيرات درجة الحرارة بدلالة الزمن نحصل على المنحني الموضح في الشكل (17) .

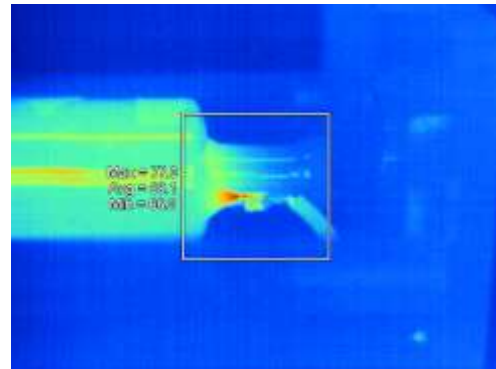


الشكل (17)

وتُوضح الصور الحرارية للخرج الليزري الموافقة لدرجتي الحرارة الأولى والأخيرة في الشكلين (18) و (19).



الشكل (19)



الشكل (18)

الاستنتاجات والتوصيات :

لاحظنا من خلال العمل التجريبي أن التبريد بالهواء هو الأقل كفاءةً ، إذ حصلنا على درجة حرارة 38.8 (C°) عند الزمن 15 (min) . (انظر الجدول 5) .

جدول (5)

تبريد	درجة الحرارة T	الزمن t
هواء	38.8	15
كهربائي	32.8	15
ماء	31.9	15

على الرغم من الصوت المزعج الذي تصدره مروحة الليزر عند عملها ، فإنها تعمل باستمرار للحفاظ على درجة حرارة ثابتة من خلال التبريد وسحب الهواء .

أما في حالة التبريد الكهربائي باستخدام مفعول بيلتيه ، فقد حصلنا على درجة حرارة 32.8 C° عند الزمن نفسه، وهذا تبريد جيد . إذ يوجد معياران أساسيان لوحدة التبريد الكهربائي تحددان مقدرة التبريد لهذه الوحدة هما :

الفرق الأعظمي بدرجة الحرارة (مقدرا بوحدة $^{\circ}\text{C}$) وأعظم قيمة تبريد . إن أكبر خطر يحيط بوحدة التبريد الكهراحراري هو انخفاض الطاقة ، أي يجب التأكد من التغذية الكاملة لوحدة التبريد الكهراحراري .

أما أفضل وسيلة للتبريد كانت عندما استخدمنا الماء ، إذ حصلنا على أخفض درجة حرارة 31.9°C عند زمن 15 min . لعل ذلك يعود للخواص المتميزة للماء مقارنة بالمبردات الأخرى ، إذ يتميز باستقراره الكيميائي وحرارته النوعية ، وموصلتيه الحراريتين العاليتين، ولزوجته المنخفضة.

لخلات الماء - كحول أو الهيدروكربونات المفطورة روابط ch أو f-h التي تتفكك إذا تجاوزت طاقة إشعاع UV طاقة الارتباط ، إذ تصبح المبردات حمضية وتنمو الرواسب.

تصمم منظومة التبريد التي يحتاجها الليزر بناءً على كمية الحرارة المتولدة عن هذا الليزر (مقيسة بوحدة Joule) التي يجب على منظومة التبريد إزاحتها لإبقاء الليزر عند درجة حرارة معينة .

كلما كانت سرعة جريان الماء كبيرة ، قل مقدار الامتصاص للحرارة ، كما تؤدي سرعة التدفق المنخفضة لنشر الحرارة إلى الأجزاء المجاورة ، مما يسبب خللاً في عملية التبريد . لذلك فإن ضبط تدفق الماء ضروري . وقد راعينا ذلك في عملنا هذا . أخيراً يجب أن تكون الأنابيب مرنة ومقاومة للحرارة ، ويمكن زيادة سطح التبريد من خلال زيادة طول أنابيب التبريد عن طريق التقافها .

المراجع:

- 1- بلال، ابراهيم كامل؛ الجندي،عاطف صالح. *فيزياء الليزر وتطبيقاته*. سورية، 2007، 515 .
- 2 - أحمد ، مها. *الترموديناميك /1* . سورية، 2011، 454.
- 3 - سيوف، فواز، *أساسيات الليزر*، سورية، 2011، 340.
- 4 - اللحياني ، سعود بن حميد . *الليزر وتطبيقاته* . المملكة العربية السعودية، 2009، 179 .
- 5 - هيئة الطاقة الذرية السورية، 2002. *أنصاف النواقل تصبح باردة*، مجلة عالم الذرة. سورية، العدد التاسع والسبعون، 2002.
- 6- KOECHNER,W;BASS,M.*Solid-State Lasers*.Springer-verlag2012 New York, Inc
- 7-MILONNI,P.W; EBERLY,J,H.*Laser physics*.copyright 2010 by wiley&sons,inc.
- 8-RANDERIA,M. *The matter in the middel*, ictp news #105 sum.2003.
- 9-HELMERSON,K;PHILLIPS,W.D;BURNETT,K; HUTCHINSON,D. *Atom Lasers*.1999, 416.