

دراسة تشكل العدسة الحرارية في مركب الكلوروفيل باستخدام ليزر مستمر

عبير غانم¹ د. محمد درغام زيدان²، أ.د. مصطفى صائم الدهر³

¹ طالبة دكتوراه، المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته، جامعة دمشق.

² مدير بحوث، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرية، دمشق.

³ أستاذ، المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته، جامعة دمشق.

الملخص

تم في هذا البحث، استخدام تقنية العدسة الحرارية لدراسة الأثر الحراري والظواهر الضوئية اللاخطية لشعاع الليزر في الكلوروفيل المُذاب بمُحل الكلوروفورم. أُجريت القياسات باستخدام ليزر عالي الاستطاعة يعمل بالنمط المستمر ذو طول موجي 532 نانومتر، وليزر سبر (هيليوم- نيون) آخر منخفض الاستطاعة ذو طول موجي 632.8 نانومتر.

سُجلت إشارة العدسة الحرارية كتابع لاستطاعة الضخ، حيث أظهرت النتائج التجريبية عند الاستطاعات العالية تغير في شكل إشارة العدسة الحرارية، وظهور ما يسمى بظاهرة الالتواء inflection point. وجرى إجراء موازنة للقيم التجريبية لإشارة العدسة الحرارية وفق نموذج رياضي يصف النفاذية المستتظمة لليزر السبر المار في العينة أثناء تشكل العدسة الحرارية، وذلك من أجل حساب عدد من المعاملات الضوئية مثل المعامل الضوئي - الحراري (dn/dT) وقرينة الانكسار اللاخطية (n_2) ومعامل الانتثار الحراري (D) . بعدئذٍ دُرِس التطور الزمني لتشكيل العدسة الحرارية. وأظهرت النتائج التجريبية إمكانية استخدام مركب الكلوروفيل كمعدّل ضوئي في الأجهزة الضوئية الإلكترونية في المستقبل.



الكلمات المفتاحية: العدسة الحرارية، المعامل الضوئي-الحراري، معامل الانتثار الحراري، الكلوروفيل.

حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية،
يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Thermal lens formation study in Chlorophyll compound using CW laser

A. Ghanem¹ Dr. M. D. Zidan² Dr. M. S. EL-Daher³

¹ Ph.D student, Higher Institute for Laser Research and Applications (HILAR), Damascus University, Syria.

² Department of Physics, Atomic Energy Commission, Damascus, Syria.

³ Higher Institute for Laser Research and Applications (HILAR), Damascus University, Syria.

Abstract

In this research, the thermal lens technique was used to study the thermal effect and the nonlinear optical phenomena of chlorophyll dissolved in a chloroform. The measurements were performed using a high-power continuous wave laser with a wavelength of 532 nm, and another low-power laser (Helium - Neon) used as a probe laser with wavelength of 632.8 nm. The thermal lens signals were recorded as function of the input pumping powers; the experimental results have shown that at high input pump powers, the curve shape of the signal changes to what is called the “inflection point phenomenon”. The experimental values of the thermal lens signals were fitted using a mathematical model in order to calculate a number of optical parameters such as: the photo-thermal coefficient (dn/dT), the nonlinear refractive index (n_2) and the thermal diffusivity (D). Then, the evolution time of thermal lens formation was studied. Our experimental results have shown the possibility of using the chlorophyll as optical modulator in the optoelectronic devices in the future.



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Keywords: Thermal lens, Optical-thermal coefficient, Thermal diffusion coefficient, Chlorophyll.

1- المقدمة:

أنجزت العديد من الدراسات في وصف التفاعل ما بين الضوء والمادة لدراسة الظواهر الناتجة عن هذا التفاعل، إلا أنه ومنذ اكتشاف أشعة الليزر، تطورت هذه الدراسات نتيجة التفاعل بين الشدات العالية للحزم الليزرية وبين المواد على اختلاف أنواعها، وبالتالي أحدثت العديد من العلوم الجديدة لدراسة هذه الظواهر وتطبيقاتها ومن أبرزها علم التحليل الطيفي والذي ينبثق عنه عدة أنواع كالتحليل الطيفي الضوئي-الحراري والذي يتضمن العديد من التقنيات الحساسة التي تعتمد على دراسة آلية الامتصاص للمادة، والتي بدأت بالمفعول الضوئي - الصوتي بمخابر بيل عام 1880 [2]. في هذه الطريقة، يؤدي امتصاص العينة للفوتونات إلى حدوث تغيير في المعاملات الحرارية، وبالتالي من خلال قياس هذه التغيرات يمكن حساب معدل الامتصاص الحاصل [2].

تعتبر مطيافية العدسة الحرارية إحدى طرق المفاعيل الضوئية - الحرارية الناتجة عن تفاعل الضوء مع المادة والتي عُرضت لأول مرة من قبل العالمين جوردن وليت عام 1965 [6]. يعتمد مبدأ تقنية العدسة الحرارية على امتصاص العينة للحزمة الليزرية الغاوسية الواردة، حيث تتحول طاقة الفوتونات الممتصة بشكل جزئي أو كلي إلى حرارة نتيجة التبادل الطاقوي بين الضوء الوارد والعينة المدروسة مما يؤدي إلى ارتفاع في درجة حرارة العينة موضعياً، والذي يقود بدوره إلى تغيير تدريجي في قرينة الانكسار اللاخطية، مما يجعل العينة تسلك سلوك عدسة مُبعدة أو مقربة، حيث يعتمد البعد البؤري لهذه العدسة على قيمة امتصاص العينة ونوعها، ويمكن مراقبة ودراسة تشكل هذه العدسة باستخدام ليزر السبر [4-16]. غالباً في حالة السوائل، تسلك العدسة الحرارية سلوك عدسة مُبعدة لكون معظم السوائل تتمدد عند التسخين.

في السنوات الأخيرة، أُعتمدت تقنية العدسة الحرارية كأداة لقياس عدة معاملات حرارية كالانتثار الضوئي، وطُبقت في العديد من المجالات العلمية كدراسة تفاعلات الكيمياء الضوئية [1-8] والخواص الحرارية الضوئية [5-9] والخواص الضوئية اللاخطية [18] في تقنية النانو [14-15].

تم تطوير العديد من الطرائق التجريبية والنماذج الرياضية لتحسين جودة وفعالية إشارة العدسة الحرارية لزيادة حساسيتها إضافة إلى التطوير في تحليل البيانات التجريبية لهذه التقنية [16,19]. إلا أن معظم هذه النماذج الرياضية كانت صالحة فقط للانزياحات الطورية الضعيفة لحزمة ليزر السبر والتي تعتمد فقط على مفهوم التوصيل الحراري لنقل الحرارة. يعتبر نموذج شين أبرز النماذج المستخدمة والذي يعتمد على تقريب إهمال أثر الحمل الحراري عندما يكون ذو قيمة صغيرة وذلك في الأوساط ذات الامتصاصية الضعيفة [20]. إلا أن هناك عدد محدود من الأدبيات التي أدرجت أثر الحمل الحراري وربطه بظاهرة الالتواء لتفسير إشارة العدسة الحرارية وذلك في الأوساط ذات الامتصاصية العالية [12]. مثل نموذج سنغال وغوسوامي الذي تم تطويره مؤخراً لدراسة أثر حالتي التوصيل الحراري والحمل الحراري على إشارة العدسة الحرارية [21].

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة وتوصيف الخواص الضوئية اللاخطية لمركب الكلوروفيل، الذي يسلك فيه ضوء الليزر سلوكاً لاخطياً وفق استجابة سريعة [17]. حيث يعتبر الكلوروفيل من المواد العضوية التي تُعد حديثاً من المركبات الواعدة ويمكن الاستفادة منها في تصنيع التجهيزات الضوئية وبكلفة اقتصادية منخفضة، وهذا ما يعطي أهمية للبحث وقيمة مُضافة نسبةً إلى الأبحاث الأخرى.

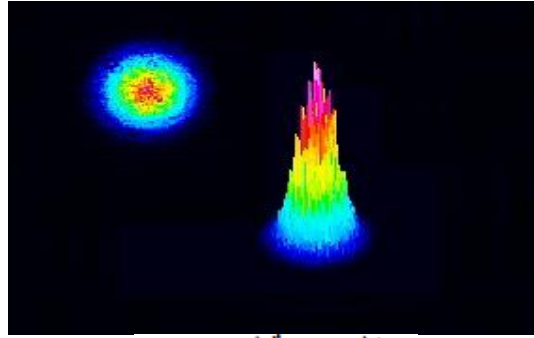
أجريت الدراسة باستخدام تقنية العدسة الحرارية لتوصيف وتفسير مفعولي التوصيل والحمل الحراريين الناشئين نتيجة لزيادة شدة ليزر الضخ، بالإضافة إلى حساب عدد من المعاملات الضوئية الحرارية الخاصة بالمركب كمعامل الانتثار الحراري D والمعامل الحراري - الضوئي dn/dT

2- مواد البحث وطرائقه:

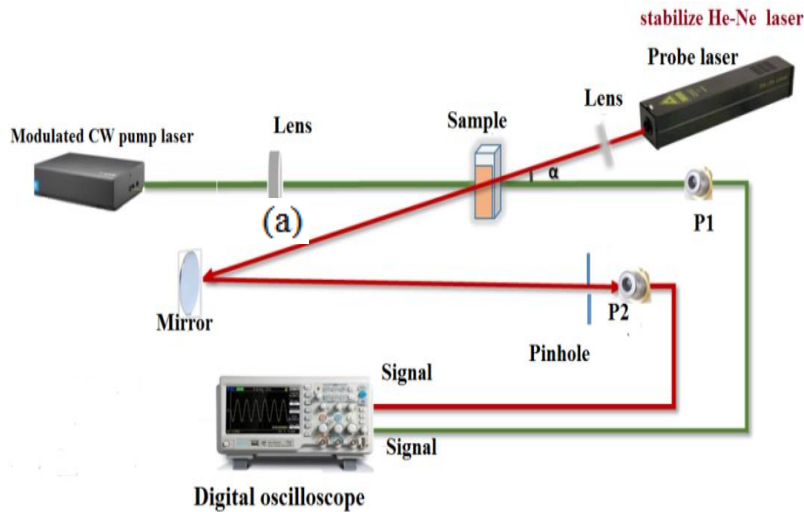
تم تأمين مادة مركب الكلوروفيل من شركة (TCI AMERICA, C0780)، فهو عبارة عن صبغة طبيعية من مادة الكلوروفيل المشتقة من النباتات، وتتكون من مواد تحتوي على الكلوروفيل (مستخرجة من نبات)، الصمغ العربي واللاككوز، ويمتلك قمة امتصاص عظمى ضمن المجال 660 - 670 nm، وأجريت العديد من التجارب لإيجاد المُذيب الملائم الذي يعطي أفضل انحلالية للكلوروفيل،

فكان الكلوروفورم هو المُحل المناسب، لذلك تم تحضير العينات المدروسة بإذابة 1000 mg من المركب بـ 15 ml في مُحل الكلوروفورم.

تم استخدام تقنية العدسة الحرارية وفق ترتيب الشعاع المزدوج غير المتطابق (dual-beam-mode-mismatched)، حيث أُستخدمت حزمتي ليزر إحداهما تعمل كمنبع ضخ لإثارة جزيئات العينة، والحزمة الثانية تُستخدم كحزمة سبر، وقد تم توجيههما نحو العينة الموضوعة في خلية كوارتز بسماكة 2 mm. يُظهر الشكل 1a المخطط التجريبي لتقنية العدسة الحرارية والموصوف بشكل موسع وتصيلي في المرجع [23]، حيث استُعمل ليزر مستمر من نوع ديود مضخوخ بليزر صلب قابل للتعديل "MGL-H-DPSS" بطول موجي 532/500 nm و\lambda = 532 nm كليزر ضخ، وأما ليزر السبر فكان ليزر هليوم - نيون مستقر ذو نمط غاوسي TEM₀₀ بطول موجي $\lambda = 632.8$ nm وبإستطاعة منخفضة (1mW) ويوضح الشكل 1b توزيع الاستطاعة بشكل جرس (غاوسي) لحزمة السبر المأخوذة بجهاز مُشكل الحزمة (Beam profiler). تم تعديل حزمة ليزر الضخ باستخدام مولد نبضات مناسب من أجل التحكم في زمن تعرض العينة للإثارة (تشغيل/إيقاف) بتردد 0.3 mHz. وسجلت إشارة حزمة السبر النافذة باستخدام كاشف سيلكوني (Thorlabs DET-110) موصول إلى راسم اهتزاز رقمي.



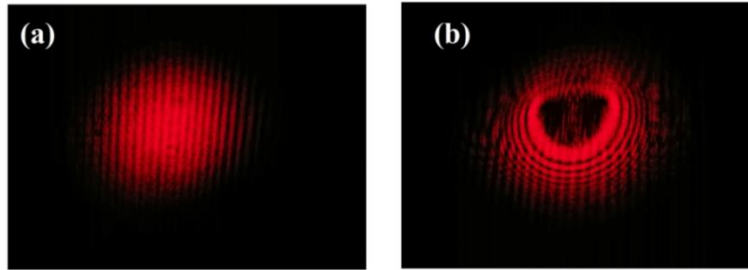
شكل حزمة ليزر (b)



الشكل 1. a المخطط التجريبي لتقنية العدسة الحرارية بحزمة مزدوجة،
b. التوزيع الغاوسي لحزمة ليزر السبر.

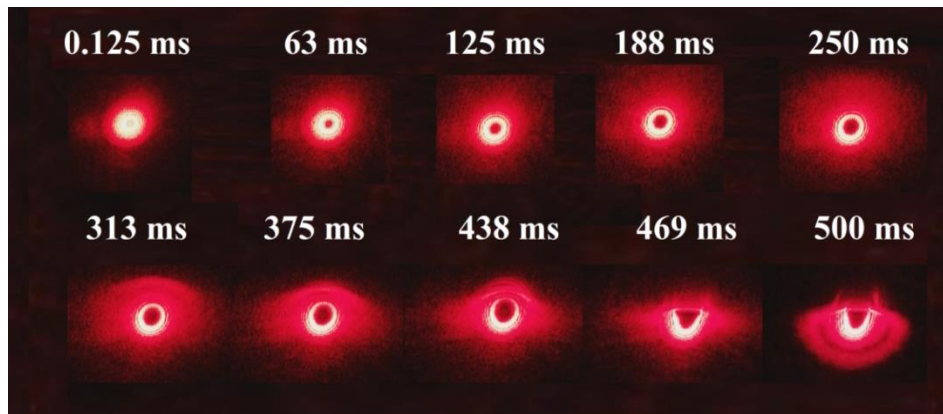
3- النتائج والمناقشة:

يظهر الشكل 2 أثر حزمة السبر المسجلة باستخدام كاميرا رقمية بعد عبورها من العينة وذلك في حالتين: (a) بدون وجود حزمة ليزر الضخ، حيث حُجبت حزمة الضخ باستخدام مرشح مناسب (b) بوجود حزمة ليزر الضخ باستطاعة $P = 20 \text{ mW}$. والشكل b يؤكد نشوء العدسة الحرارية داخل العينة كنتيجة لحزمة الضخ التي جرى امتصاصها من قبل جزيئات العينة المدروسة، وتحول جزء من هذه الطاقة الممتصة إلى حرارة أدت إلى حدوث تسخين موضعي لجزيئات محلول العينة وتمدهه، وبالتالي أدى إلى تغير تدريجي في قرينة الانكسار اللاخطية موافق لتغير درجة حرارة المحلول الموضعي، والذي يظهر كنتيجة بسلوك العينة التي تسلك سلوك عدسة حرارية مبعدة.



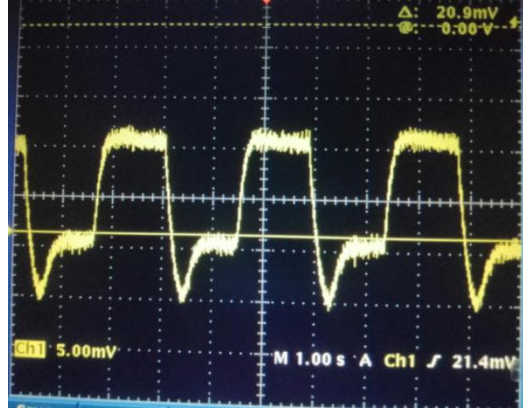
الشكل 2. (a) بقعة ليزر السبر بدون حزمة ليزر الضخ، (b) بقعة ليزر السبر مع حزمة الضخ داخل العينة

يوضح الشكل 3 مراحل التطور الزمني لتشكل العدسة الحرارية عند استطاعة ضخ $P = 50 \text{ mW}$. وقد سجلت باستخدام كاميرا رقمية، وكما يظهر في الشكل فإن تشكل العدسة الحرارية وتطورها يكون ضمن زمن تشعيع العينة بليزر الضخ، حيث لوحظ أنه عند الزمن $t = 0.125 \text{ ms}$ لا أثر لتشكل العدسة الحرارية، وعند الزمن $t = 63 \text{ ms}$ يبدأ تشكل العدسة الحرارية ويزداد حجم المنطقة المجوفة مع الزمن بشكل دائري متناظر لتصل إلى حالة استقرار في الحجم والشكل المتناظر عند الزمن $t = 250 \text{ ms}$ ، ثم يبدأ التشوه (distortion) في الجزء العلوي من هذا التجويف مع الزمن، ويمكن تفسير هذا التشوه ببداية ظهور مفعول الحمل الحراري (convection effect) كنتيجة لزيادة التسخين الحاصل ضمن العينة إلى جانب مفعول التوصيل الحراري (conduction effect) الذي أعتبر الأثر المسيطر الوحيد ببداية تشكل العدسة الحرارية.



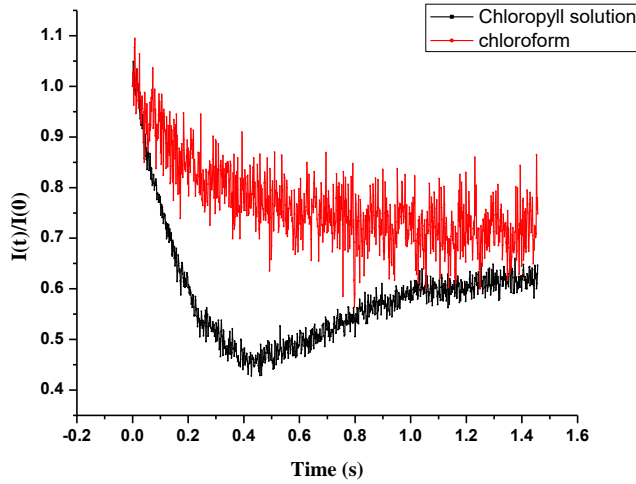
الشكل 3. التطور الزمني للعدسة الحرارية عند استطاعة ضخ واردة $P = 50 \text{ mW}$.

يُظهر الشكل 4 إشارة حزمة ليزر السبر على شاشة راسم الاهتزاز الرقمي في حالتها التشغيل وإيقاف حزمة الضخ المعدلة باستخدام مولد نبضات وتتكرر هذه الإشارة تبعاً للتردد المُطبق على حزمة الضخ ($f = 0.3 \text{ MHz}$).



الشكل 4. إشارة العدسة الحرارية النافذة من العينة، عند استطاعة ضخ $P = 20 \text{ mW}$.

قمنا بتسجيل إشارة العدسة الحرارية لمذيب الكلوروفوروم النقي ومقارنتها مع إشارة العدسة الحرارية لعينة الكلوروفيل المُذابة بالكلوروفوروم، وذلك عند استطاعة ضخ ثابتة $P = 20 \text{ mW}$ ، يوضح الشكل 5 أن سعة إشارة العدسة الحرارية للمذيب فقط ذات قيمة صغرى بالمقارنة مع سعة الإشارة لمركب الكلوروفيل المُذاب بالكلوروفوروم، وقد جرى محاولة تسجيل إشارة العدسة الحرارية للمذيب (الكلوروفوروم) ولم يتمكن من تسجيل أي إشارة للعدسة الحرارية للمذيب عند الاستطاعات الأعلى، وهذا ما يدل على أن مفعول العدسة الحرارية ناتج فقط عن محلول الكلوروفيل، وبهذا يمكن إهمال أثر المُذيب.



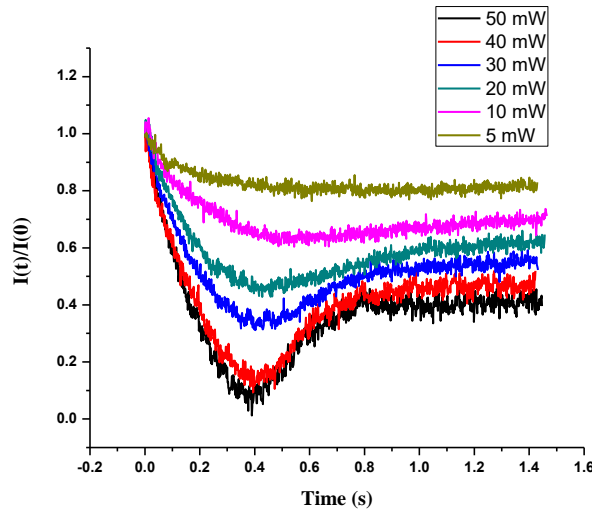
الشكل 5. إشارات العدسة الحرارية للكلوروفوروم فقط (الخط الأحمر) ومحلول الكلوروفيل المُذاب بالكلوروفوروم (الخط الأسود) عند استطاعة ضخ $P = 20 \text{ mW}$.

من أجل دراسة العلاقة ما بين تشكل العدسة الحرارية واستطاعة ليزر الضخ، تم تسجيل إشارة العدسة الحرارية لعينة الكلوروفيل عند استطاعات ضخ مختلفة بدايةً من الاستطاعات المنخفضة وصولاً للاستطاعات العالية. يبين الشكل 6 إشارة العدسة الحرارية للعينة بدلالة تغير استطاعات ليزر الضخ الواردة على العينة بحالة الفصل الزمني (time resolved)، حيث يمكننا أن نلاحظ اختلاف في شكل وسلوك الإشارة عند الاستطاعات العالية وذلك بزيادة سعة الإشارة وظهور ما يسمى بظاهرة الالتواء (inflection point) [21,13]. ويمكن الاستدلال على التعيين الكمي لظاهرة الالتواء في الشكل 6 من قياس سعة الإشارة المدرجة على المحور العمودي.

ويمكن تفسير ظاهرة الالتواء الناشئة عند الاستطاعات العالية وفق تشكل تيارات الحمل الحراري عند هذه الاستطاعات، حيث كما هو معروف أنه عند نشوء الحرارة ضمن الأوساط السائلة نتيجة التسخين، فإن الوسط يسعى إلى حالة توازن حراري جديدة عن طريق نشوء تيارات النقل الحراري التي تكون هي المسيطرة في حالة ضخ الوسط باستطاعات منخفضة، أما في حال الضخ باستطاعات عالية فإن

الحرارة سترتفع ضمن منطقة التسخين وعند زمن معين ستبدأ طبقات السائل بالانزياح نحو الأعلى نتيجة لارتفاع حرارتها وانخفاض كثافتها لتحل محلها الطبقات ذات درجة الحرارة الأقل والكثافة الأعلى، ويعبر عن هذه الظاهرة بتيارات الحمل الحراري التي تنشأ إلى جانب تيارات النقل الحراري الأساسية في حالة الضخ بالاستطاعات العالية.

وفقاً للأدبيات والدراسات المرجعية، فإن ظاهرة الالتواء المشككة لإشارة العدسة الحرارية تحدث نتيجة للتفاعل الضوئي الكيميائي داخل العينة أو بسبب الامتصاص القوي دون حدوث تفكك ضوئي للعينة المدروسة [13]. في دراستنا الحالية ليس هناك أي دليل على حدوث تفاعل ضوئي-كيميائي، لذا فإن هذه الظاهرة تعزى لشدة امتصاص العينة وذلك لأن الخصائص الفيزيائية للعينة (لون المركب ومعامل الامتصاص الخطي) لم تتغير قبل وبعد أثناء تكرار التجربة عدة مرات، كما تم تكرار التجربة عند الاستطاعات العالية ومن ثم العودة إلى الاستطاعات المنخفضة، وسُجلت نفس النتائج السابقة مما يدل على احتفاظ العينة بخواصها الفيزيائية.

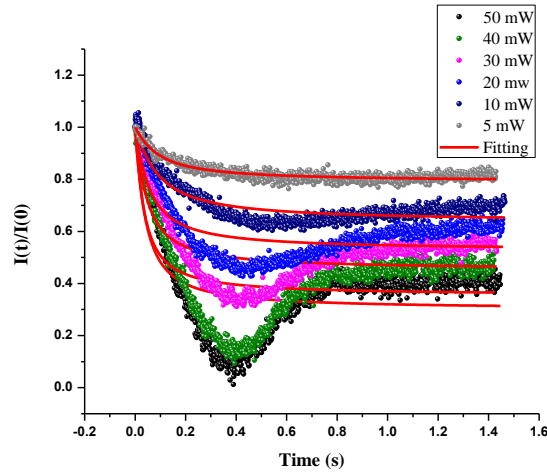


الشكل 6. إشارات العدسة الحرارية لمحلول الكلوروفيل عند عدة استطاعات ضخ مختلفة.

من أجل حساب المعاملات الحرارية الضوئية المتعلقة بتقنية العدسة الحرارية، فإنه لا بد من إجراء عملية مواعمة للبيانات التجريبية وفق نموذج رياضي معروف، فقد تم تطبيق نموذج شين وفق المعادلة الرياضية (1) لمواعمة البيانات التجريبية [20]:

$$I(t) = I(0) \left[1 - \frac{\theta}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2mV}{[(1+2m)^2 + V^2] \left(\frac{t_c}{2t} \right) + 1 + 2m + V^2} \right) \right]^2 \quad (1)$$

حيث t_c هي زمن الانتثار الحراري المميز للوسط، θ التشوه الطوري لحزمة السبر والمعاملات m و V هي معاملات تجريبية $m = \left(\frac{\omega_p}{\omega_e} \right)^2$ حيث ω_e هي أنصاف أقطار حزمتي السبر والضخ داخل العينة على التوالي و $V \approx \left(\frac{Z_1}{Z_c} \right)$ ، $Z_c = 2 \times Z_R$ طول رايلي، Z_1 هي المسافة بين موضع خصر حزمة السبر وموضع العينة وشرحت هذه المعاملات مفصلاً في بحث سابق [23]. فقد لوحظ أن نموذج شين الرياضي صالح فقط عند الاستطاعات المنخفضة كما يوضح الشكل 7، حيث وجد أن منحنيات المواعمة وفق هذا النموذج غير قابلة للتطبيق عند الاستطاعات العالية وظهور ظاهرة الالتواء لإشارة العدسة الحرارية، فهو يُهمل أثر الحمل الحراري المسيطر بالاستطاعات العالية، لذلك كان لا بد من تطبيق نموذج آخر يأخذ بعين الاعتبار أثر مفعول الحمل الحراري إضافة إلى مفعول التوصيل الحراري السائد وهو نموذج غوسوامي [21].



الشكل 7. إشارات العدسة الحرارية لمحلول الكلوروفيل عند عدة استطاعات ضخ مختلفة، الخط الأحمر يعبر عن منحنيات الموامة وفق نموذج شين.

يُعبّر عن نموذج غوسومي بالمعادلة الرياضية التالية [21,13]:

$$\frac{I(t)}{I(0)} = \left[1 - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2mV}{[(1+2m)^2 + V^2] \left(\frac{t_c}{2t} \right) + 1 + 2m + V^2} \right) \right]^2 + F \left[\frac{\theta_1 + \theta_2}{4} \ln \left\{ \frac{[1 + 2m/(1 + \frac{2t}{t_c})]^2 + V^2}{(1+2m)^2 + V^2} \right\} \right]^2 \quad (2)$$

حيث:

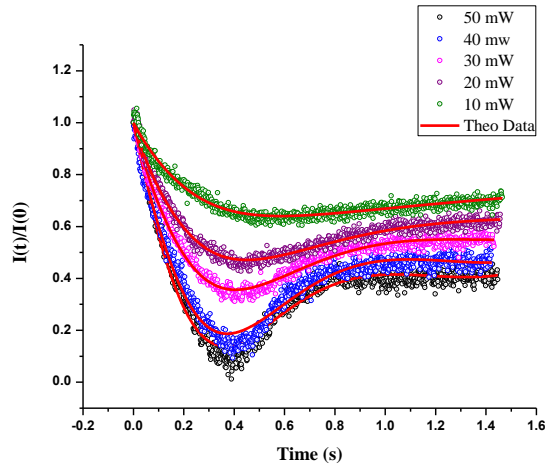
$$\theta_1 = - \frac{A \frac{dn}{dT}}{k \lambda_p} \quad (3)$$

$$\theta_2 = -\theta_{conv} * \exp\left(-\frac{t_d}{t}\right) \quad (4)$$

$$\theta_{conv} = \frac{(\alpha P_e - A) \frac{dn}{dT}}{h \lambda_p} \quad (5)$$

حيث t_c ثابت الزمن المميز للعينة بحالة النقل الحراري و t_d ثابت الزمن بحالة الحمل الحراري، h فعالية نظام انتقال الحرارة بالحمل الحراري و k معامل النقل الحراري و $\frac{dn}{dT}$ المعامل الحراري-الضوئي و P_e استطاعة ليزر الضخ و λ_p الطول الموجي لحزمة السبر وشرحت هذه المعاملات في المرجع [22,13].

يبين الشكل 8 نتائج موامة البيانات التجريبية لإشارة العدسة الحرارية لعينة الكلوروفيل المُذابة بالكلوروفورم وفق نموذج غوسومي، حيث يُلاحظ توافق بنسبة كبيرة بين البيانات التجريبية مع الموامة النظرية وخاصة عند الاستطاعات العالية بنسبة خطأ لا تتجاوز 0.96، حيث يُلاحظ بمنحني الموامة أنه عند ازدياد قيم t_c يزداد ميلان المنحني نحو الاتجاه الموجب بالنسبة للمحور الزمني، بينما بزيادة قيم t_d يزداد تعريض الالتواء في المنحنيات الواضحة في الشكل 8. مما يدل على أن نموذج غوسومي قابل للتطبيق ومناسب لتوصيف نتائجنا المتعلقة بالمركب الحالي والذي درس لأول مرة بتقنية العدسة الحرارية.



الشكل 8. إشارات العدسة الحرارية لمحول الكلوروفيل عند عدة استطاعات ضخ مختلفة، الخط الأحمر يعبر عن منحنيات المواءمة وفق نموذج غوسوامي.

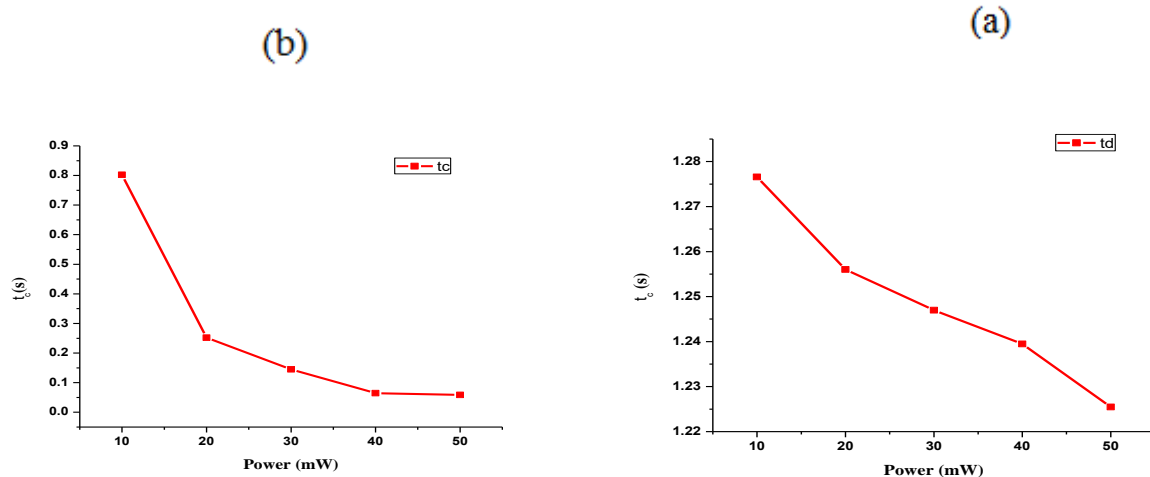
تم الحصول على جميع المعاملات مثل: المعامل الضوئي- الحراري dn/dT ومعامل الانتشار الحراري بالحمل h وثابت الزمن بحالة التوصيل الحراري t_c وثابت الزمن بحالة الحمل الحراري t_d للعينة المدروسة عند استطاعات مختلفة لحزمة الضخ عن طريق إجراء عملية مواءمة للبيانات التجريبية لإشارات العدسة الحرارية باستخدام المعادلة (2) وأدرجت بالجدول 1. قمنا بحساب التشوه الطوري لحزمة السبر بحالة التوصيل الحراري θ_1 والتشوه الطوري بحالة الحمل الحراري θ_{conv} بالاعتماد على المعادلات (3) و(5). كما تم حساب الانتشارية الحرارية "D" للوسط الماص وقريبة الانكسار اللاخطية n_2 ، وتغير قريبة الانكسار Δn باستخدام المعادلات التالية [3]:

$$(6) \quad D = \frac{\omega_0^2}{4 t_c}$$

$$(7) \quad n_2 = \frac{dn}{dT} \frac{\alpha_0 \omega_0^2}{4 k}$$

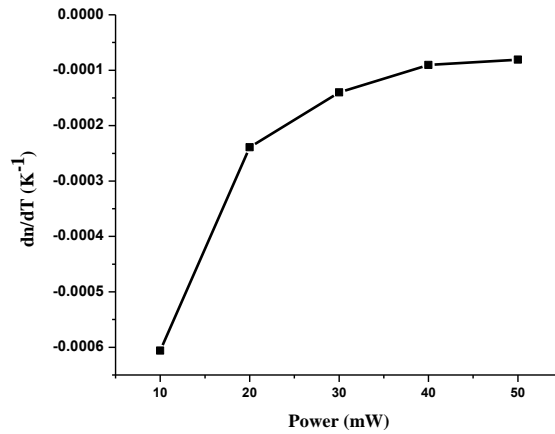
$$(8) \quad \Delta n = n_2 I$$

حيث: w_0 نصف قطر حزمة الليزر ضمن العينة، α_0 معامل الامتصاص الخطي للعينة، K هو الناقلية الحرارية للمُذيب، وحُسبت هذه المعاملات عند عدة استطاعات ضخ مختلفة كما هو موضح بالجدول 2. يبين الشكل 9(a-b) العلاقة ما بين المعامل t_c (ثابت الزمن بحالة التوصيل الحراري) والمعامل t_d (ثابت زمن بحالة الحمل الحراري) للعينة عند تطبيق استطاعات مختلفة للضخ. يلاحظ تناقص هذه المعاملات مع ازدياد الاستطاعة، بينما تتزايد قيمة المعامل الضوئي- الحراري dn/dT مع ازدياد استطاعة الضخ كما هو موضح بالشكل 10.



الشكل 9. (a) تغير t_c بدلالة استطاعة الضخ، (b) تغير t_d بدلالة استطاعة الضخ

أخيراً يمكن مقارنة نتائج هذا العمل مع أعمال سابقة التي بينت تقارب في النتائج النظرية والتجريبية كما هو موضح في الجدول 3 . [23,22].



الشكل 10. تغير المعامل الحراري - الضوئي dn/dT بدلالة تغير استطاعة الضخ.

الجدول 1. قيم المعاملات t_c ، t_d ، F ، A ، h المحسوبة من منحنى المواعمة لإشارة العدسة الحرارية بتطبيق المعادلة 2 لمحلول الكلوروفيل المُذاب بالكلوروفورم.

| Power (mw) | t_c (s) $\times 10^{-1}$ | t_d (s) | $F \times 10^{-4}$ | $A \times 10^{-2}$ | dn/dt (K^{-1}) $\times 10^{-4}$ | h (W/cm.K) $\times 10^{-4}$ |
|------------|----------------------------|-----------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 10 | 8.02 | 1.27659 | 2.60 | 5.18 | -6.06 | 9.405 |
| 20 | 2.52 | 1.25602 | 2.61 | 7.77 | -2.39 | 7.897 |
| 30 | 1.45 | 1.24699 | 2.61 | 9.58 | -1.40 | 7.209 |
| 40 | 0.645 | 1.23947 | 2.63 ⁴ | 8.08 | -0.907 | 6.926 |
| 50 | 0.583 | 1.22548 | 2.03 | 8.61 | -0.811 | 6.607 |

الجدول 2. المعاملات المحسوبة Δn ، n_2 ، D ، θ_{conv} ، θ_1 لمحلول الكلوروفيل المُذاب بالكلوروفورم.

| Power (mW) | θ_1 | θ_{conv} | D (cm ² /s) $\times 10^{-5}$ | n_2 (cm ² /W) $\times 10^{-6}$ | Δn $\times 10^{-3}$ |
|------------|------------|-----------------|---|--|--------------------------------|
| 10 | 89 | 60.278 | 0.496 | -4.80 | -1.92 |
| 20 | 52.6 | 31.852 | 1.58 | -1.89 | -1.52 |
| 30 | 38 | 17.920 | 2.74 | -1.11 | -1.33 |
| 40 | 20.8 | -3.310 | 6.17 | -0.719 | -1.15 |
| 50 | 19.8 | -9.658 | 6.83 | -0.643 | -1.29 |

الجدول 3. مقارنة لنتائج العمل الحالي للقيم D و $\frac{dn}{dt}$ و n_2 مع نتائج أعمال سابقة.

| المعاملات | D (cm ² /s) | $\frac{dn}{dt}$ (k ⁻¹) | n_2 (cm ² /W) |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| المرجع [22] | 1.04×10^{-5} | -2.32×10^{-4} | -1.24×10^{-6} |
| المرجع [23] | 5×10^{-3} | -2.11×10^{-6} | -8.46×10^{-8} |
| العمل الحالي | 6.83×10^{-5} | -0.811×10^{-4} | -0.64×10^{-6} |

4-الخلاصة

تم دراسة وتوصيف عينة الكلوروفيل المُذابة بالكلوروفورم باستخدام تقنية العدسة الحرارية بترتيب الشعاع المزدوج غير المتطابق، ولُوحظ ازدياد أثر العدسة الحرارية بازدياد استطاعة ليزر الضخ الواردة على العينة وحدوث تشوه لشكل العدسة الحرارية عند الاستطاعات العالية، وقد سُجل التطور الزمني لتشكل العدسة الحرارية عند استطاعة ضخ ثابتة ومراقبة التغير الحاصل في شكل حزمة السبر النافذة من العينة.

كما تم استعمال نموذج غوسومي الجديد لمواءمة النتائج التجريبية لإشارة العدسة الحراري، والذي يأخذ بعين الاعتبار أثر كلٍ من مفعولي التوصيل والنقل الحراري، وبالتالي حُسبت من خلاله عدد من المعاملات الضوئية المتعلقة بالعدسة الحرارية كمعامل الانتثار الحراري D، والمعامل الضوئي- الحراري dn/dT ، وثابت الزمن الحراري بحالتي التوصيل والنقل الحراري t_c ، t_d ، وقرينة الانكسار اللاخطية للعينة المدروسة n_2 .

المراجع:

- 1- Astrath, N. G. C., Astrath, F. B. G., Shen, J.; Zhou, J., Michaelian, K. H., Fairbridge, C., Malacarne, L. C., Pedreira, P. R. B., Medina, N., Baesso, M. L., 2009, Thermal-Lens Study of Photochemical Reaction Kinetics. *Opt. Lett.* 34, 3460–3462.
- 2- Bell, A.G, 1880, On the production and reproduction of sound by light: the photophone, *American Journal of Science* October, s3-20 (118) 305-324.
- 3- Carvalho, A., Carmo, A.P., Bell, M.J.V., Anjos, V., Kassab, L.R.P., da Silva, D.M., 2012, Optical and thermal investigation of GeO₂-PbO thin films doped with Au and Ag nanoparticles, *Thin Solid Films* 520, 2667–2671.
- 4- Comean, D., Heache, A, Melikech, N. , 2003, Reflective thermal lensing and optical measurement of thermal diffusivity in liquids, *Appl. Phys. Lett.* 83 (2) 246.
- 5- De Melo, P. B., Nunes, A. M., Omena, L., Nascimento, S. M. S. do, da Silva, M. G. A., Meneghetti, M. R., de Oliveira, I. N. , 2015, Thermo-Optical Properties and Nonlinear Optical Response of Smectic Liquid Crystals Containing Gold Nanoparticles. *Phys. Rev. E*, 92, No. 042504.
- 6- Gordon, J.P. ,Leite, R.C.C. , More, R.S. , Porto, S.P.S. , Whinnery, J.R. , 1965, Long-Transient Effects in Lasers with Inserted Liquid Samples, *Journal of Applied Physics* 36, 3
- 7- Herculano, L. S.; Astrath, N. G. C.; Malacarne, L. C.; Rohling, J.H.; Tanimoto, S. T.; Baesso, M. L. 2011, Laser-Induced Chemical Reaction Characterization in Photosensitive Aqueous Solutions, *J. Phys. Chem. B*, 115, 9417–9420.
- 8- Herculano, L. S.; Malacarne, L. C.; Zanuto, V. S.; Lukasiewicz, G.V. B.; Capeloto, O. A.; Astrath, N. G. C., 2013, Investigation of the Photobleaching Process of Eosin y in Aqueous Solution by Thermal Lens Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, 117, 1932–1937.
- 9- Jimenez-Perez, J. L., Pincel, P. V., Cruz-Orea, A., Correa-Pacheco, Z. N., 2016, Thermal Characterization of a Liquid Resin for 3D Printing Using Photothermal Techniques. *Appl. Phys. A*, 122, 556.
- 10- Jimenez-Perez, J. L., Lopez Gamboa, G., Gutierrez Fuentes, R., Sanchez Ramirez, J. F., Correa Pacheco, Z. N., Lopez-y-Lopez, V. E., Tepech-Carrillo, L., 2016, Synthesis and Thermal Properties of New Bionanofluids Containing Gold Nanoparticles, *Appl. Phys. A*, 122, 925.
- 11- John, J., Thomas, L., Kurian, A., George, S. D., 2016, Enhanced Heat Diffusion in Nanofluid via DNA Mediated Aggregation. *RSC Adv*, 6, 62390–62398.
- 12- Karimzadeh, R., Arshadi, M. ,2013, Thermal Lens Measurement of the Nonlinear Phase Shift and Convection Velocity. *Laser Phys*, 23, No. 115402.
- 13- Kumar, P., Khan, A , Goswami, D. ,2014, Importance of molecular heat convection in time resolved thermal lens study of highly absorbing samples, *Chemical Physics* 441 5–10.
- 14- Lenart, V. M. ,Astrath, N.G.C. ,Turchiello, R.F. , Goya, G.F., Gomez, S.L., 2018, Thermal diffusivity of ferrofluids as a function of particle size determined using the mode-mismatched dual-beam thermal lens technique, *J. Appl. Phys.* 123 085107.
- 15- Lopes, C.S. ,Lenart, V.M. ,Turchiello, R.F. , Gómez, S.L. ,2018, Determination of the thermal diffusivity of plasmonic nanofluids containing PVP-coated Ag nanoparticles using mode-mismatched dual-beam thermal lens technique, *Adv. Condens. Matter Phys.* 1–6, 3052793.
- 16- Marcano, A. ,Loper, C. , Melikechi, N. , 2002, Pump–probe mode-mismatched thermal-lens Z scan, *Journal of the Optical Society of America B* Vol. 19, Issue 1, pp. 119-124.
- 17- Rodrigues Jr., J.J., Silva, C.H.T.P., Zilio, S.C., Misoguti, L. ,Mendonca, C.R. ,2002, Femtosecond Z-scan measurements of nonlinear refraction in amino acid solutions, *Optik* Mat. 20 153–157.
- 18- Rodriguez, L., Chiesa, M., 2011, Measurement of the Two-Photon Absorption Cross Section by Means of Femtosecond Thermal Lensing. *Appl. Opt.* 50, 3240
- 19- Sabaeian, M.; Nadgaran, H., 2013, An Analytical Model for Finite Radius Dual-Beam Mode-Mismatched Thermal Lens Spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 114, No. 133102.
- 20- Shen, J., Lowe, R.D., Snook, R. D. ,1992, A model for cw laser induced mode-mismatched dual-beam thermal lens spectrometry, *Chemical Physics*, 165 ,385–396.
- 21- Singhal, S., Goswami, D., 2019, Thermal Lens Study of NIR Femtosecond Laser-Induced Convection in Alcohols, Department of Chemistry, Indian Institute of Technology, Kanpur 208016, Uttar Pradesh, India, *ACS Omega*, 4, 1889–1896.

- 22- Zidan, M.D., Arfan,A., EL-Daher, M. S., Allahham,A., Ghanem, A., Naima, D., 2021, Thermal lens study of the 8- hydroxyquinolin-1-ium 4-aminobenzenesulfonate, Optical Materials, 117, 111133.
- 23- Zidan. M.D., Al-Ktaifani, M., EL-Daher,M S., Allahham,A. , Ghanem,A. ,2021,Thermal lens study of the Tris(2',2-bipyridyl)iron(II) tetrafluoroborate, Optoelectronics Letters, 17(3): 183.