

دراسة أنماط حلقات الانعراج للكلوروفيل باستخدام تقنية التعديل الطوري الذاتي المكاني

عبير غانم* د. محمد درغام زيدان ** د. مصطفى صائم الدهر***

الملخص

في هذه المقالة، دُرِسَ تشكل أنماط حلقات الانعراج بالحقل البعيد في محلول الكلوروفيل وذلك نتيجة التعديل ذاتي الطور المكاني (SSPM) لحزمة ليزر الضخ ذات الموجة المستمرة $\lambda=532\text{ nm}$ ، من أجل تحديد عدد من البارامترات الضوئية اللاخطية كقربنة الانكسار الضوئية اللاخطية n_2 والمعامل الضوئي الحراري dn/dT . كما دُرِسَ التطور الزمني لحلقات الانعراج المُتشكلة، وقد لُوِجِظَ ظهور مفعول الانضغاط على حلقات الانعراج مع ازدياد زمن تعرض العينة للتشعيع بالليزر والذي قُسِّرَ تبعاً لتيارات الحمل الحراري ومفعول الجاذبية.

الكلمات المفتاحية: أنماط حلقات الانعراج، المعامل الضوئي الحراري، التعديل الطوري الذاتي المكاني.

طالبة دكتوراه، المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته، جامعة دمشق، سوريا.*
** مدير بحوث، قسم الفيزياء، هيئة الطاقة الذرية، دمشق، سوريا.
*** أستاذ، المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته، جامعة دمشق، سوريا.

Investigation of the Diffraction Ring Patterns of Chlorophyll Using Spatial Self-phase Modulation Technique

A. Ghanem* Dr. M. D. Zidan** Dr. M. S. EL-Daher***

Abstract

In this paper, the formation of the diffraction ring patterns at far field of chlorophyll was studied as a result of the Spatial Self-Phase modulation (SSPM) of the CW laser beam with $\lambda=532$ nm. The SSPM technique was used to determine several of nonlinear optical parameters such as the nonlinear optical refractive index n_2 and the thermo-optic coefficient dn/dT .

The evolution time of the formed diffraction rings was also investigated, the compression effect on the diffraction rings was observed with the increase in laser irradiation time on the studied sample, which was explained by the thermal convection currents and the gravitational effect.

Keywords: Diffraction ring patterns, Thermo – optic coefficient, spatial self-phase modulation.

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

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

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

1-المقدمة:

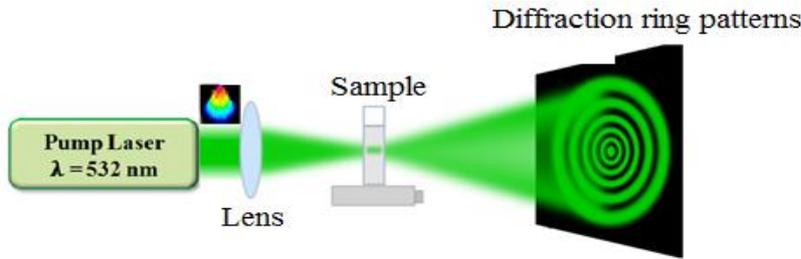
عند تفاعل الحزمة الليزرية ذات الشدة العالية مع وسط ماص لاخطي (Nonlinear absorption medium)، ينشأ عدد من الظواهر الضوئية اللاخطية مثل التمرق الذاتي/أو اللاتمرق الذاتي وتشكل حلقات الانعراج.... الخ [1] وتنشأ هذه الظواهر نتيجة للتغير في قرينة الانكسار اللاخطية (n_2) للوسط تبعاً للتعديل الطوري ($\Delta\phi_0$) للحزمة الليزرية الغوصية TEM_{00} داخل الوسط اللاخطي [2].

هناك الكثير من التقنيات المستخدمة لدراسة الظواهر الضوئية اللاخطية للمواد اللاخطية وتوصيفها كتقنية المسح وفق المحور Z [3-4] وتقنية التعديل المكاني ذاتي الطور -SSPM (Spatial Self-Phase modulation) [5-6] التي تعتمد على الانعراج الذاتي للأشعة، ومن ثمّ يمكن رصد تشكل حلقات الانعراج في الحقل البعيد نتيجة للتداخل الحاصل بين الأشعة الليزرية المتوازية النافذة من الوسط اللاخطي والتي تملك انزياحات طورية مختلفة [7-8]. لوحظت هذه الظاهرة في الكثير من المواد كالبولورات السائلة والمواد الصباغية والبوليمرات والجسيمات النانوية [9-10]. عُرض شرح مبسط وتفسيرٍ لآلية التعديل الطوري الذاتي المكاني (SSPM) في عدد من الأعمال السابقة التي درست عدداً من المركبات اللاخطية [11-13].

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة الخواص الضوئية اللاخطية NLO لمركب الكلوروفيل باستخدام تقنية التعديل الطوري الذاتي المكاني، حيث سنعرض تشكل حلقات الانعراج في الحقل البعيد نتيجة تفاعل شعاع ليزر مستمر CW ذي طول الموجة 532 nm مع محلول الكلوروفيل. سوف نتطرق أيضاً إلى دراسة العلاقة ما بين عدد حلقات الانعراج واستطاعة الدخل لحزمة ليزر الضخ، كما سنعرض دراسة التطور الزمني لحلقات الانعراج المتشكلة عن العينة المدروسة في الحقل البعيد.

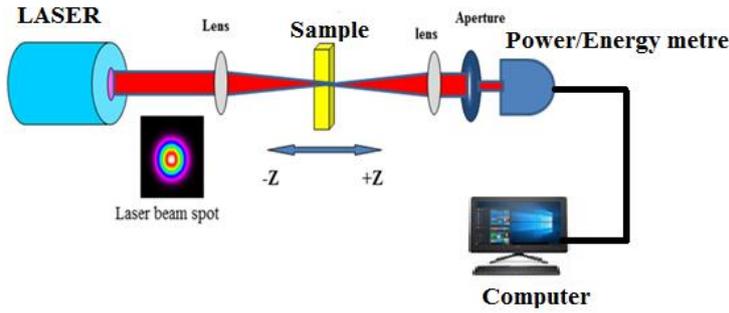
2- مواد البحث وطرائقه:

جرى تأمين مادة الكلوروفيل من شركة (TCI AMERICA, C0780)، وحُضِرَت العينات المدروسة عن طريق إذابة 1000 mg من المركب بـ 15 mL في محل الكلوروفورم. يوضح الشكل (1) المخطط التجريبي لتقنية التعديل الطوري الذاتي المكاني، حيث اُستخدم ليزر صلب مضخوخ بديود (DPSS) (MGL-H-532/500) ذي طول موجة $\lambda = 532\text{nm}$ وباستطاعة عظمية تصل لـ 500mW ويمكن أن يعمل بالنمط المستمر Continuous Wave أو بنمط التعديل، كما اُستخدمت عدسة محدبة الوجهين $f=100\text{mm}$ لتبئير (محرقة) الحزمة الليزرية داخل العينة الموضوعة ضمن خلية كوارتز بسماكة 2mm، تظهر حلقات الانعراج على شاشة متوضعة على بعد D من العينة و جرى رصد أنماط حلقات الانعراج المتولدة بوساطة الكاميرا الرقمية من نوع (Laser-CAM IIID Coherent beam profiler). شُرح المخطط التجريبي بالتفصيل في عمل سابق [14].



الشكل (1) المخطط التجريبي لتقنية التعديل الطوري الذاتي المكاني

اُستخدمت تقنية المسح الضوئي وفق المحور Z بحالة الحظار المغلق (closed Z-Scan) والتي تعتمد على مبدأ تغيير كثافة الاستطاعة الليزرية الواردة على العينة داخل الخلية باستخدام عدسة مُحَرَقَة، بحيث تكون أعظم قيمة لكثافة الاستطاعة عند نقطة المحرق. يظهر الشكل (2) المخطط التجريبي لتقنية المسح وفق المحور Z والموصوفة بشكل موسع وتفصيلي في المرجع [15].



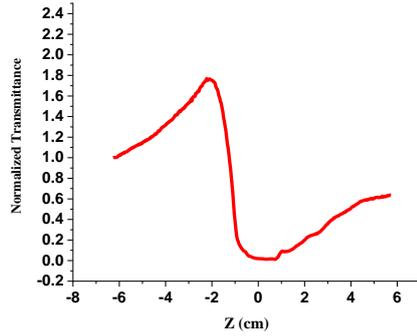
الشكل (2) المخطط التجريبي لتقنية المسح وفق المحور Z

3- النتائج والمناقشة:

أُجريت قياسات المسح وفق المحور Z بحالة الحظار المغلق، بالتزامن مع تسجيل تشكل حلقات الانعراج في الحقل البعيد باستخدام ليزر CW بطول موجة 532 nm لمادة الكلوروفيل المذابة في مُحل الكلوروفورم. يبين الشكل (3) النفاذية المستتظمة لتقنية المسح وفق المحور Z بحالة الحظار المغلق كتابع للموضع z عند استطاعة ليزر الضخ التي تساوي $p = 20$ mW. إن السمة الأساسية للمنحني المُسجل هي عبارة عن ذروة (قمة) يليها وادٍ، وهذا يعني أن محلول الكلوروفيل يسلك سلوك مادة لامتمحقة ذاتياً ولها قرينة انكسار لاختطية سالبة (n_2) وذلك وفقاً للدراسات المرجعية المنشورة [15]. نظراً لأن الليزر المُستخدم هو ليزر مستمر CW، فإن المنشأ الفيزيائي للظاهرة اللاخطية المتكونة في العينة والتي تؤدي لتغير قرينة الانكسار اللاخطية (n_2) يكون حرارياً [17]. يمكن تحديد قيمة الانزياح الطوري اللاخطي الناتج ($\Delta\Phi_0$) عند المحرق باستعمال المعادلة الآتية [18]:

$$(1) \quad \Delta T_{p-v} = 0.406(1 - S)^{0.25} |\Delta\Phi_0|$$

حيث T هي النفاذية المستتظمة للمنحني في الشكل (3)، S هي النفاذية الخطية.

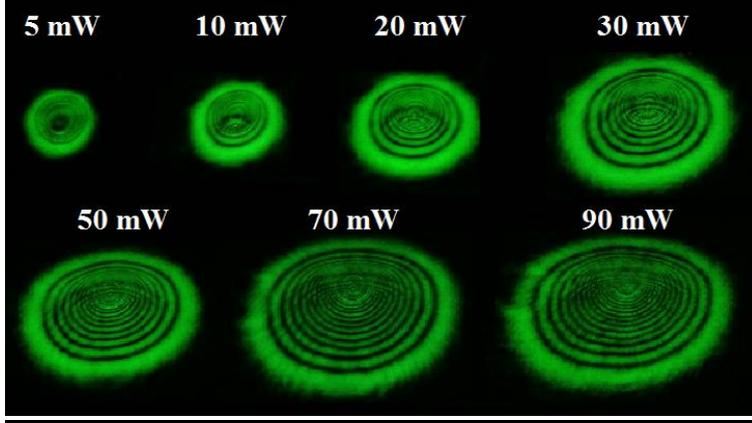


الشكل (3) منحنى المسح وفق المحور Z بحالة الحظار المغلق عند استطاعة الضخ $P = 20 \text{ mW}$

حُسِبَت قيمة الانزياح الطوري باستخدام المعادلة (1) وكانت حوالي $\Delta\Phi_0 = 4.462$ ، وهذا يعني أن $\pi < \Delta\Phi_0$ ، يشير هذا إلى أن الآلية داخل العينة المدروسة هي الانزياح الطوري المكاني الذاتي والتي تؤدي إلى توليد حلقات الانعراج [14]. وقد ركز البحث الحالي على دراسة تأثير استطاعة الدخل لليزر الضخ والتطور الزمني لتشكل أنماط حلقات الانعراج بالحقل البعيد للعينة المدروسة.

يوضح الشكل (4) تشكل أنماط حلقات الانعراج لمحلول الكوروفيل مع تغير استطاعة ليزر الضخ، كما ظهرت على الشاشة خلف العينة وسُجِّلَت باستخدام كاميرا رقمية. لوحظ ازدياد في حجم وعدد حلقات الانعراج مع زيادة الشدة الواردة تدريجياً على العينة، كما لوحظ أيضاً أنه عند الاستطاعات المنخفضة لحزمة ليزر الضخ تمتلك حلقات الانعراج شكلاً دائرياً متناظراً، إلا أنه عند زيادة الاستطاعة الليزرية يطرأ تشوه على الشكل الخارجي لحلقات الانعراج وتصبح غير متناظرة، وذلك عند الجزء العلوي للحلقة. تدعى هذه الظاهرة بمفعول الانضغاط (collapse effect) والذي يُفسَّرُ بالاعتماد على آلية الامتصاص لمحلول العينة المدروسة، حيث إنَّه نتيجة لتشعيع الوسط اللاخطي الماص باستخدام ليزر مستمر CW فإن ذلك يؤدي إلى تسخين جزيئات المحلول تبعاً للمفاعيل الحرارية كمفعول التوصيل الحراري ومفعول النقل الحراري، الذي يظهر أثره بشكل ملموس عند الاستطاعات

العالية، إضافة إلى أثر الجاذبية الأرضية والتي تكون معاكسة بالاتجاه لتيارات النقل الحراري [18].



الشكل (4) حلقات الانعراج المسجلة بدلالة عدة استطاعات مختلفة لليزر الضخ

يرتبط الانزياح الطوري اللاخطي $\Delta\Phi_0$ بعدد الحلقات الملاحظة (N) بالعلاقة الآتية [2-19]:

$$\Delta\Phi_0 = 2\pi N \quad (2)$$

كما أنه يُعبر عن تغير الانزياح الطوري اللاخطي للحزمة الواردة على العينة بدلالة تغير قرينة انكسار الوسط بالعلاقة الآتية [20]:

$$\Delta\Phi_0 = \Delta n k_0 L_{\text{eff}} \quad (3)$$

حيث $k_0=2\pi/\lambda$ العدد الموجي و L_{eff} الطول الفعال للعينة ($L_{\text{eff}}= 0.177 \text{ cm}$)

يعبر عن التغير في قرينة الانكسار Δn على المحور الأفقي بالعلاقة الآتية [19]:

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \frac{I \alpha_0 \omega_0^2}{4k} \quad (4)$$

حيث k هي الانتشارية الحرارية للمذيب ($K= 0.1115 \text{ W/(m.K)}$ للكوروفورم)، و T هي درجة حرارة المحلول، و α_0 هي معامل الامتصاص الخطي، و ω_0 منطقة خسر الحزمة.

إضافة إلى ذلك، يرتبط الحد Δn بقرينة الانكسار الكلية للوسط (n)، وقرينة الانكسار الخطية (n_0) بالعلاقة الآتية [21]:

$$n = n_0 + \Delta n \quad (5)$$

وأيضاً

$$\Delta n = n_2 I \quad (6)$$

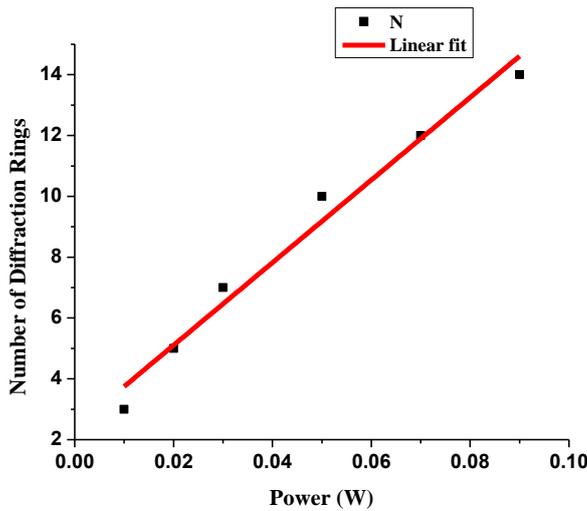
حيث (n_2) هي قرينة الانكسار اللاخطية، و I هي شدة شعاع ليزر الضخ ($I = 2p/\pi w^2$).
بجمع المعادلات من (2) إلى (6)، نحصل على المعادلتين الآتيتين [2]:

$$n_2 = \frac{\pi \omega_0^2 \lambda N}{2 L_{eff} P} \quad (7)$$

و

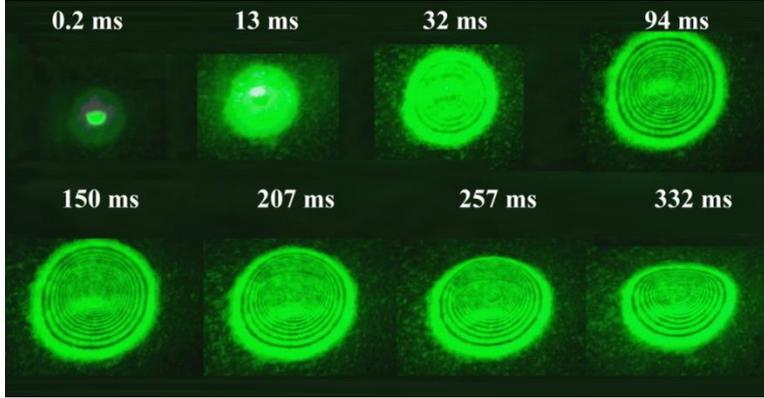
$$\left(\frac{dn}{dT}\right) = \frac{4 n_2 k}{\alpha_0 \omega_0^2} \quad (8)$$

يبين الشكل (5) العلاقة بين عدد حلقات الانعراج المُسجلة بالحقل البعيد واستطاعة ليزر الضخ، حيث يشير الخط الأحمر إلى نتيجة موأمة البيانات التجريبية المُقاسة. وبالاعتماد على المعادلة (7) حُسِبَ الميل للمنحني التجريبي ($\frac{N}{P} = 135$) الموضح بالشكل (5)، وباستخدام المعادلات 4 و 7 و 8 تمكنا من حساب البارامترات الضوئية اللاخطية $n_2 = 4.968 \times 10^{-7} (\text{cm}^2/\text{w})$ و $\frac{dn}{dT} = 1.41 \times 10^{-5} (\text{k}^{-1})$ لمحلول الكلوروفيل عن طريق موأمة البيانات التجريبية.



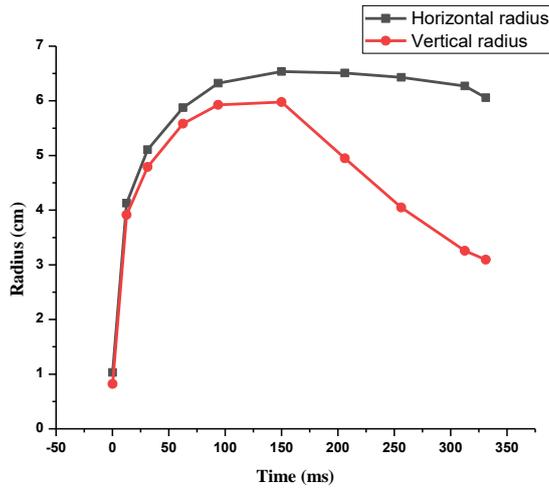
الشكل (5) عدد حلقات الانعراج المسجلة بدلالة استطاعة ليزر الضخ.

يوضح الشكل (6) التطور الزمني لتشكل حلقات الانعراج لمحلول الكلوروفيل والمسجلة بالحقل البعيد عند استطاعة ليزر الضخ $P=90\text{ mW}$. فكما هو ملاحظ أنه عند الزمن $t=0.2\text{ms}$ لا وجود لأي حلقات انعراج، ومن بداية الزمن $t=32\text{ ms}$ تبدأ حلقات الانعراج بالتشكل ويزداد حجمها مع الزمن حتى الوصول للزمن $t=150\text{ms}$ والتي يكون شكلها ذو طابع دائري متناظر، وذلك تبعاً لمفعول النقل الحراري المتناظر، إلا أنه وعند بداية الزمن $t=207\text{ms}$ تبدأ حلقات الانعراج بالتشوه، فكما هو ملاحظ من الشكل (6) تتعرض حلقات الانعراج للانضغاط في الجزء العلوي من الحلقات وذلك بشكل عمودي، وهذا عائد إلى تيارات الحمل الحراري المتشكلة نتيجة لاستمرار التشعيع الليزري إضافة إلى تأثير الجاذبية الأرضية بالاتجاه المعاكس [5,22]. ويزداد مفعول الانضغاط بالاتجاه العمودي مع الزمن حتى الوصول للزمن $t=332\text{ms}$ ، عندها يصل إلى حالة من الاستقرار والثبات.



الشكل (6) التطور الزمني لحلقات الانعراج المسجلة عند استطاعة ليزر الضخ $P = 90 \text{ mW}$

يُظهر الشكل (7) التغير في أنصاف أقطار الحلقة الخارجية لحلقات الانعراج بالاتجاهين العمودي والأفقي مع الزمن وذلك من أجل استطاعة ليزر الضخ $P=90 \text{ mW}$ ، نلاحظ أن أنصاف الأقطار بالاتجاهين العمودي والأفقي تزداد مع الزمن وتكون ذات قيمة متساوية تقريباً، حتى الوصول إلى زمن معين يبدأ بعدها الاختلاف بين نصفي القطرين العمودي والأفقي، بحيث يستمر نصف القطر بالاتجاه الأفقي بالتزايد مع الزمن حتى يصل إلى حالة مستقرة، بينما يتناقص نصف القطر بالاتجاه العمودي مع الزمن، وذلك تبعاً لمفعول الانضغاط المُتشكل في الاتجاه العمودي من الحلقة.



الشكل (7) تغير أنصاف أقطار حلقات الانعراج بالاتجاهين العمودي والأفقي مع الزمن

عند استطاعة ضخ $P = 90 \text{ mW}$

أظهرت النتائج الحالية التي أدت إلى حساب كل من قرينة الانكسار اللاخطية n_2 والمعامل الحراري الضوئي و $\frac{dn}{dT}$ إلى تطابق وتوافق جيد مع أعمال سابقة [14,22]، كما أُجريت الدراسة على عينة من المذيب النقي فقط، ولم يظهر أي أثر لخطي، وهذا يدل على أن الأفعال اللاخطية ناتجة فقط عن المادة المذابة.

4- الخلاصة:

دُرِسَ في هذا البحث مركب الكلوروفيل المُذاب بالكلوروفورم باستخدام تقنية SSPM. أظهرت الدراسة تشكل حلقات الانعراج للعينة بالحقل البعيد نتيجة لتشيعها بواسطة ليزر مستمر CW وأيضاً وجود تناسب خطي بين عدد الحلقات المُتشكلة واستطاعة ليزر الضخ الواردة على العينة. وقد أدت نتائجنا إلى حساب قيمة قرينة الانكسار اللاخطية n_2 والمعامل الحراري الضوئي $\frac{dn}{dT}$ ، كما سُجِّلَ تطور حلقات الانعراج زمنياً لوحظَ نشوء مفعول الانضغاط بالاتجاه العمودي لتشكل الحلقات. فسرت ظاهرة الانضغاط وفقاً للمفاعيل

الحرارية التي تحدث داخل العينة ولا سيما مفعول التوصيل الحراري ومفعول النقل الحراري الذي يظهر أثره عند الاستطاعات العالية، إضافة إلى أثر الجاذبية الأرضية والتي تكون معاكسة بالاتجاه لتيارات النقل الحراري.

شكر:

يتقدم المؤلفون بالشكر للأستاذ الدكتور إبراهيم عثمان، المدير العام لهيئة الطاقة الذرية، والأستاذ الدكتور محمد خير صبرة رئيس قسم الفيزياء في هيئة الطاقة الذرية، وإلى الدكتورة ماجدة نحيلي عميدة المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته في جامعة دمشق على دعمهم المستمر.

المراجع:

- [1] Brasselet E, Galstian T. V., 2001, Optical multi stability and confined orientational states in nematic liquid crystals: strong excitation regime, *Journal of the Optical Society of America B* Vol. 18, Issue 7, 982-988.
- [2] Hassan Q. M. A, Badran H. A, AL-Ahmad. A. Y, Emshary. C. A, 2013, Physical origin of observed nonlinearities in Poly (1-naphthyl methacrylate): Using single transistor-transistor logic modulated laser beam, *Chinese Physics B* Vol. 22(11):4209.
- [3] Saravanan M , Sabari Girisun. T. C, Vinitha. G, 2016, Third-order nonlinear optical properties and power limiting behavior of magnesium ferrite under CW laser (532 nm, 50 mW) excitation , *Journal of Materials Science* , Vol. 51, 3289–3296.
- [4] Zidan. M. D, Allaf. A. W, Allahham. A, Alzier. A, 2020, Nonlinear Optical study of chromium tetrapyrroledicarbonyl Complex, *Optik* Vol. 200, 163175.
- [5] Elias. R. S, Hassan. Q. M. A, Sultan. H. A , Al-Asadi. A. S, Saeed. B. A, Emshary C. A, 2018, Thermal nonlinearities for three curcuminoids measured by diffraction ring patterns and Z-scan under visible CW laser illumination, *Optics & Laser Technology*, Vol 107, 131-141.
- [6] Jia. Y, Shan. Y, Wu. L, Dai. X, Fan. D, and Xiang. Y, 2018, Broadband nonlinear optical resonance and all-optical switching of liquid phase exfoliated tungsten diselenide, *Photonics Research*, Vol. 6, Issue 11, 1040-1047.
- [7] Yue J., Zhongfu L., Muhamad S., Jie T., Houzhi C., Yuaniang X., 2019, Kerr Nonlinearity in germanium selenide nanoflakes measured by Z-scan and spatial self-phase modulation techniques and its applications in all-optical information conversion, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 27, Issue 15, 20857.
- [8] Karimzadeh, R. ,2012, Spatial self-phase modulation of a laser beam propagating through liquids with self-induced natural convection flow. *Journal of Optics*, 14(9), 095701. doi:10.1088/2040-8978/14/9/095701

- [9] Brugioni S., Meucci R., 2002, Self-phase modulation in a nematic liquid crystal film induced by a low-power CO₂ laser, *Optics Communications* 206(4):445-451.
- [10] Mao Z, Qiao L, He F, Liao Y, Wang C, Cheng Y, 2009, Thermal-induced nonlinear optical characteristics of ethanol solution doped with silver nanoparticles, *Chinese Optics Letters*, Vol. 7, Issue 10, 949-952.
- [11] Wu Y. L., Q. Wu, F. Sun, C. Cheng, S. Meng, J. M. Zhao, 2015, Emergence of electron coherence and two-color all-optical switching in MoS₂ based on spatial self-phase modulation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 11800.
- [12] Wang, W. H., Wu, Y. L., Wu, Q., Hua, J. J., Zhao, J. M., 2016, Coherent Nonlinear Optical Response Spatial Self-Phase Modulation in MoSe₂ Nano-Sheets, *Scientific Reports*, 6, 22072.
- [13] Wu, Y. L., Zhu L. L., Wu, Q., Sun, F., Wei, J. K., Tian, Y. C., Wang, W. L., Bai X. D., Zuo X., Zhao J., 2016, Electronic origin of spatial self-phase modulation: Evidenced by comparing graphite with C₆₀ and graphene, *Applied Physics Letters* 108, 241110.
- [14] Zidan. M.D, Al-Ktaifani. M.M, El-Daher. M.S, Allahham. A, Ghanem. A, 2020, Diffraction ring patterns and nonlinear measurements of the Tris(2,2'-bipyridyl)iron(II) tetrafluoroborate, *Optics & Laser Technology*, Vol. 131, 106449.
- [15] Zidan, M. D., Allaf. A. W, et al, 2020. Investigation of nonlinear optical properties of chromium tetrapyrrole dicarbonyl complex, *Optik* Vol. 200: 163175.
- [16] Zidan. M.D, Arfan. A, El-Daher. M.S, Allahham. A, Ghanem. A, Alsous. M.B, 2021, Synthesis and diffraction ring patterns of 8-hydroxyquinolin-1-ium 4-aminobenzenesulfonate, *Optik*, Vol. 243, 167439.
- [17] Sheik-Bahae, M., Said, A. A., Wei, T.-H., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W., 1990, Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 26(4), 760–769. doi:10.1109/3.53394
- [18] Kadhum. A. J, Hussein. N. A, Hassan. Q. M. A, Sultan. H. A, Al-Asadi. A. S, Emsary. C. A, 2018, Investigating the nonlinear behavior of cobalt (II) phthalocyanine using visible CW laser beam, *Optik*, Vol. 157, 540-550.

- [19] Ogusu, K., Kohtani, Y., & Shao, H. ,1996,Laser-Induced Diffraction Rings from an Absorbing Solution. *Optical Review*, 3(4), 232–234. doi:10.1007/s10043-996-0232-1
- [20] Elias. R. S, Q. M. A. Hassan. Q. M. A, Emsary. C. A, Sultan. H. A ,Saeed. B. A, 2019,Formation and temporal evolution of diffraction ring patterns in a newly prepared dihydropyridone, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 223, 117297.
- [21] Milanchian, K., Tajalli, H., Eyni, Z., Zakerhamidi, M. S., 2016,Study of molecular aggregation effects on the nonlinear refractive index and absorption of Oxazin 720 laser dye. *Canadian Journal of Physics*, 94(9), 834–838. doi:10.1139/cjp-2015-0427
- [22] Wu. L, Xie. Z, Lu. L, Zhao. J, Wang. Y, Jiang. X, Ge. Y, Zhang. F, Lu. S, Guo. Z, Liu. J, Xiang. Y, Xu. S, Li. J, Fan. D, Zhang. H,2017, Few-Layer Tin Sulfide: A Promising Black-Phosphorus-Analogue 2D Material with Exceptionally Large Nonlinear Optical Response, High Stability, and Applications in All-Optical Switching and Wavelength Conversion, *Advanced Optical Mater.*, 1700985. DOI: 10.1002/adom.201700985.