

Study of Tunable Polarization Separator Using of Interaction Technique between Ultrasound Waves and Laser

Dr. Ibrahim Bilal *

Dr. Afif Sakkour **

Majd Abbas ***

(Received 25 / 3 / 2024. Accepted 10 / 7 / 2024)

□ ABSTRACT □

Many applications in physics and communications need to separate the polarization of a light wave into the two fundamental components. We mention, for example, spectral analyzers, devices for measuring and analyzing light polarization, and the technique of doubling the transmission rate on optical fibers using the property of light polarization.

Currently, passive optical elements are used to separate polarization, which depend on sticking prisms with their optical axes perpendicular, such as (Rochon Prism) and (Nicol Prism). However, the use of negative optical elements to separate the polarization is accompanied by several technical problems, including the inability of these elements to select a specific wavelength, and there is no possibility to control the intensity of the light beam in the output of the polarization separator of the negative type.

The research proposes the use of the technique of interaction between ultrasound and optical waves within a mono-axial optical crystal and proves the effectiveness of using this technique to solve the problem. The research relied on the design of the polarization separator on the crystal of tellurium dioxide (TeO_2) as a reaction medium, an ultrasound transducer was used that generates transversely polarized ultrasound waves whose propagation speed within the crystal can be controlled. The numerical and design calculations of the polarization interval were performed on a crystal (TeO_2). The effectiveness and importance of the proposed technique for separating the polarization of two signals carried on the same wavelength were mathematically demonstrated in this research. Where the first channel is transmitted on the horizontal polarization of the optical carrier and the second on the vertical polarization of the same carrier through an optical fiber, which necessitates the separation of the two signals from each other at the receiving side by means of an effective polarization separator, and therefore the commercially marketed passive prisms are unable to accomplish the purpose.

Keywords: separate polarization, negative optical elements, mono-axial optical crystal, ultrasound transducer, optical carrier, semiconductor lasers.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor-Department of physics-Faculty Sciences-Tishreen University-Lattakia-Syria.

** Associate Professor-Department of Communications-Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Tishreen University-Lattakia-Syria.

*** Postgraduate Student (Master)-Department of physics- Faculty Sciences- Tishreen University Lattakia-Syria. majdabbas@gmail.com

دراسة فاصل استقطاب قابل للتوليف باستخدام تقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والليزر

د. إبراهيم بلال*

د. عفيف صقور**

مجد عباس***

(تاريخ الإيداع 2024 / 3 / 25. قُبِلَ للنشر في 2024 / 7 / 10)

□ ملخص □

تحتاج العديد من التطبيقات في الفيزياء والاتصالات إلى فصل استقطاب الموجة الضوئية إلى مركبتيه الأساسيتين، على سبيل المثال، كأجهزة التحليل الطيفي وأجهزة قياس وتحليل استقطاب الضوء وتقنية مضاعفة معدل الإرسال على الألياف الضوئية باستخدام خاصية استقطاب الضوء.

يتم حالياً، استخدام عناصر ضوئية (بصرية) غير فعّالة (سلبية) لفصل الاستقطاب، تعتمد على لصق موشورات محاورها الضوئية متعامدة مثل موشور روشون (Rochon Prism) وموشور نيكول (Nicol Prism). لكن استخدام العناصر الضوئية السلبية يرافقه مشاكل تقنية عدّة، منها عدم قدرة هذه العناصر انتقاء طول موجي معين إذ ليس هناك إمكانية للتحكم بشدة الشعاع الضوئي في خرج فاصل الاستقطاب من النوع السلبي.

يقترح البحث استخدام تقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، ضمن بلورة أحادية المحور الضوئي، ويبرهن البحث على فعالية استخدام هذه التقنية لحل المشكلة المطروحة. اعتمد البحث في تصميم فاصل الاستقطاب على بلورة ثنائي أكسيد التيلوريوم (TeO_2) كوسط للتفاعل، واستخدم محول أمواج فوق صوتية يولد أمواج فوق صوتية عرضانية الاستقطاب (Transverse Ultrasonic Transducer)، يمكن التحكم بسرعة انتشارها داخل البلورة. أنجزت الحسابات الرقمية والتصميمية لفاصل الاستقطاب على بلورة (TeO_2). تم البرهان رياضياً في متن البحث، على أهمية وفعالية التقنية المطروحة في فصل استقطاب إشارتين محملتين على نفس الطول الموجي، حيث ترسل القناة الأولى على الاستقطاب الأفقي للحامل الضوئي، بينما ترسل القناة الثانية على الاستقطاب الشاقولي لنفس الحامل عبر الليف الضوئي، هذا يستدعي فصل الإشارتين عن بعضهما بجهة الاستقبال بواسطة فاصل فعال للاستقطاب. وتجدر الإشارة إلى أن الموشورات السلبية المسوقة تجارياً غير قادرة على إنجاز ذلك.

الكلمات المفتاحية: فاصل استقطاب - عناصر ضوئية سلبية - بلورة أحادية المحور الضوئي - محول أمواج فوق صوتية - حامل ضوئي - ليزرات انصاف نواقل.

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



CC BY-NC-SA 04

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

** أستاذ مساعد - قسم الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

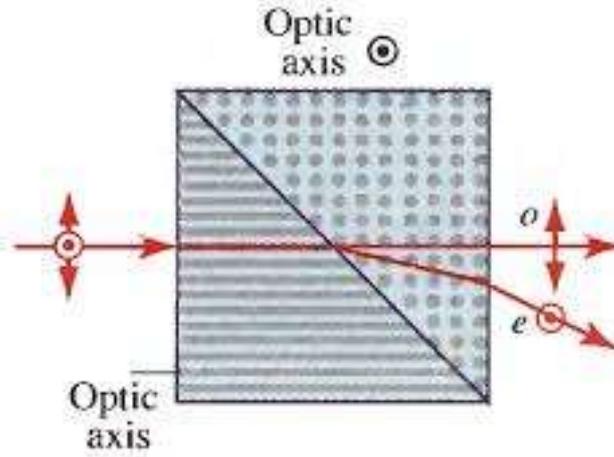
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. majdabbas@gmail.com

مقدمة:

تتعدد التطبيقات التي تحتاج في عملها ودقة أدائها إلى فصل استقطاب شعاع ليزري (أو موجة ضوئية في الحالة العامة)، إلى مركبتي الاستقطاب الأساسيتين (العادية وغير العادية). على سبيل المثال، نذكر منها [1,2,3,4]:

- تسوية استطاعة الحوامل الضوئية في الاتصالات الضوئية (البصرية)، فائقة السرعة.
- أجهزة قياس تحليل استقطاب الضوء.
- الإسقاط ثلاثي الأبعاد (مجسم)، للإشارة الفيديوية (Video)، على شاشات ذات أبعاد كبيرة.
- تقنيات تجميع الإشارات باستخدام الاستقطاب للاتصال عبر الألياف الضوئية وحيدة النمط (SMF).

تنتشر تقنيات تقليدية لفصل استقطاب شعاع ليزري تعتمد على تجميع (لصق) موشورات محاورها الضوئية متعامدة ويرتكز مبدأ عملها على الانكسار المزدوج كما هو الحال في موشور روشون (Rochon prism) المبين في الشكل (1) [5,6].



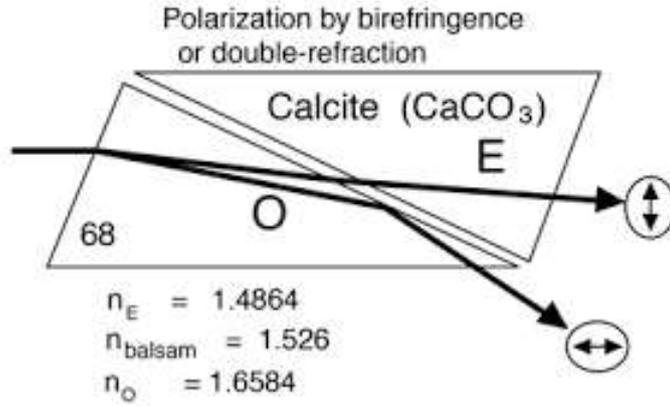
الشكل (1): موشور (Rochon prism).

يلاحظ من الشكل (1) أن ضوءاً وارداً غير مستقطب ينقسم إلى الحالتين الأساسيتين للاستقطاب (o and e rays) وتكون الزاوية بين الشعاعين المستقطبين في خرج فاصل الاستقطاب (Rochon prism) معطاة بالعلاقة التالية:

$$\theta_i = (n_e - n_o) \tan(A) \quad (1)$$

حيث (A) زاوية رأس الموشور، (n_o, n_e) قرائن الانكسار المرافقة.

يسوق تجارياً لنموذج آخر مهم لفصل الاستقطاب وهو موشور نيكول (Nicol prism) الذي يتكون من موشورين من الكالسيت مثبتين معاً بطبقة من بلسم كندا (زيت يستخرج من أشجار تنوب كندا)، كما هو موضح في الشكل (2) يدخل شعاع ضوئي غير مستقطب وحيد اللون موازياً لوجهه الطويل فينقسم إلى شعاع عادي وشعاع غير عادي. نحصل بذلك في خرج العنصر الضوئي (الموشور الفاصل للاستقطاب) على شعاع مستقطب [6,7].



الشكل (2): موشور نيكول (يعتمد طريقة الانكسار الداخلي الكلي).

تتميز العناصر الضوئية الفاصلة للاستقطاب والمعتمدة على لصق الموشورات ببساطة بنيتها وسهولة استخدامها ولكنها غير قادرة على:

- 1- انتقاء طول موجي معين من بين عدة أطوال موجية.
- 2- التحكم בזاوية الفصل بين الشعاعين (o and e rays).
- 3- التحكم بشدة الشعاع الضوئي في خرج فاصل الاستقطاب.
- 4- التحكم بنسبة التخميد ($T = I_o/I_E$).

بمعاينة مساوي العناصر الضوئية الفاصلة للاستقطاب نجد أنه لا بد من تطوير تقنيات أخرى تتيح التغلب على المساوي المذكورة أعلاه. ضمن هذا الإطار يقترح البحث استخدام تقنية التفاعل (Acousto-optic)، لتصميم فاصل استقطاب قادر على انتقاء طول موجي معين وفصل استقطابه إلى المركبتين الأساسيتين (o and e rays).

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في إمكانية استخدام تقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية ضمن بلورة ثنائي أكسيد التيلوريوم (TeO_2)، وهي بلورة أحادية المحور الضوئي، لتصميم دارة ضوئية قادرة على فصل الاستقطاب والتغلب على مساوي العناصر الضوئية الفاصلة للاستقطاب المسوقة تجارياً. كما يهدف البحث إلى انجاز دراسة تصميمية لفاصل استقطاب يعمل ضمن النافذة المرئية (Visible) وتحت الأحمر (IR) ويستخدم تقنية التفاعل (Acousto-optic) وتحديد جميع المواصفات الفنية لفاصل الاستقطاب فوق الصوتي - ضوئي.

طرائق البحث ومواده:

يقترح البحث استخدام تقنية التفاعل (Acousto-optic) لتصميم فاصل استقطاب يعمل ضمن نطاق عريض من الأطوال الموجية يشمل المجال المرئي والمجال تحت الأحمر، بهدف التغلب على مساوي فاصل استقطاب تقليدي لتحقيق الهدف، أنجزت دراسة مرجعية دقيقة لتقنيات فصل الاستقطاب ومنها تقنية التفاعل (Acousto-optic)، التي تركز عليها الأبحاث من أجل تطبيقات عملية عديدة.

تطلب البحث دراسة في مجال انتشار الأمواج فوق الصوتية داخل بلورة غير متناحية أحادية المحور الضوئي. وكذلك دراسة معمقة لانتشار الأمواج الضوئية والتفاعل فيما بينهما ومن ثم اختيار نمط تفاعل مناسب (سوف يتم شرحه ضمن البحث)، وتحليله رياضياً وتطبيقه على بلورة ثنائي أكسيد التيلوريوم (TeO_2) كوسط تفاعل. تم برمجة العلاقات الرياضية المستنتجة تحليلياً باكواد ماتلاب (MATLAB)، حيث تقدم مخرجات البرنامج توصيفاً كاملاً ودقيقاً لفاصل الاستقطاب المصمم.

1 - دراسة مرجعية لتقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية:

إن انعراج الضوء (Diffraction)، من قبل موجة فوق صوتية هي ظاهرة معروفة منذ زمن بعيد. يرجع الفضل إلى العالم الفرنسي بريوني، الذي برهن على أنه عندما تنتشر موجة مرنة (موجة فوق صوتية) داخل سائل فإن هذا الأخير يتصرف كشبكة انعراج للضوء [7]. تم تأكيد هذه الأعمال بشكل تجريبي بعد عشرات السنوات من قبل دييبي وسيارس (Debye, Sears) [8]، وكذلك من قبل ليوكاس وبيكوارد (Lucas, Biquard). اقترح العالمان رامن وناث (Raman, Nath) [8]، فيما بعد عبر سلسلة من المقالات العلمية، تعميماً لنظرية العالم بريوني. ارتبط اسم العالمين بحالة خاصة للتداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، وهي الحالة التي تنتشر فيها الأشعة الضوئية في عدة اتجاهات. وضع العالمان باتيا ونوبل (Bhatia, Noble)، نظرية تتضمن دراسة التداخل في الحالة العامة (نظام رامن وناث) وكذلك الحالة الخاصة التي تسمح بتركيز الطاقة في اتجاه واحد فقط، ودعت هذه الحالة بنظام براغ (Bragg). حدث لنظرية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، فقرة تقنية نوعية خصوصاً بعد ظهور الليزر، إذ فتح ظهور الأشعة الضوئية المترابطة وذات اللون الواحد تقريباً (تردد واحد) حقلاً واسعاً جداً من التطبيقات لنظرية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية. ساهمت عملية اتقان صناعة محولات للأمواج فوق الصوتية (Transducteur) ذات التردد العالي وكذلك تكوين مواد جديدة ذات خصائص نوعية (فوق صوتية، ضوئية، وكذلك فوق صوتية - ضوئية) إلى تطوير نظرية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية.

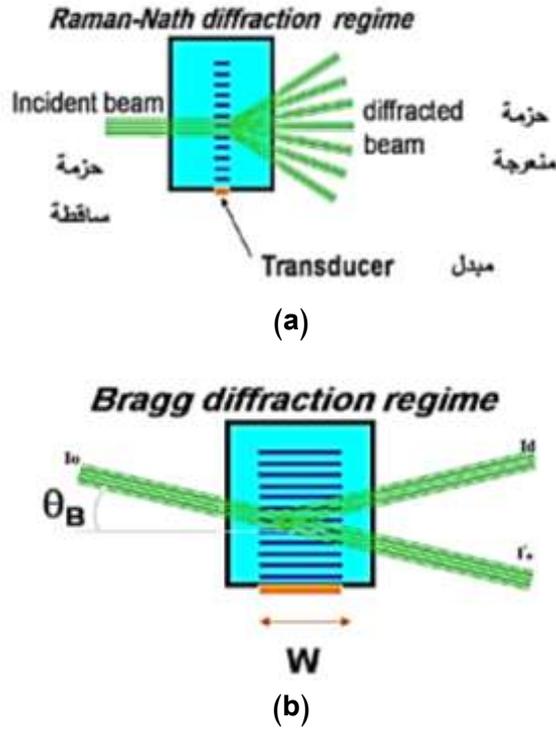
2 - التفاعل في نظام رامن ونظام براغ:

تعمل الموجة فوق الصوتية، عند انتشارها في وسط شفاف (بلوري)، على تغيير خصائصه الضوئية، يؤدي هذا بدوره إلى انعراج الضوء على جبهة الموجة فوق الصوتية عند تحقق شرط محدد عند طول موجة ضوئية معين. يشبه المبدأ الفيزيائي لتقنية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية مبدأ عمل الشبكات الطورية [9,10]. يمكن التمييز بين نوعين أساسيين لتقنية التداخل فوق صوتي - ضوئي:

1- نظام رامن - ناث.

2- نظام براغ.

تنتشر الأمواج الضوئية في النوع الأول بشكل موازٍ لجبهة الموجة فوق الصوتية وتتحرف إلى عدة أشعة ضوئية بشكل متناظر على جانبي الشعاع الضوئي الوارد كما في الشكل (a-3). بينما في نظام التداخل من نوع براغ تحرف كامل طاقة الموجة الضوئية الواردة في اتجاه محدد كما في الشكل (b-3) وفي بحثنا هذا سوف نعتد نظام براغ من أجل إجراء الدراسة المطلوبة.



الشكل (3): (a) نظام تداخل رامان - ناث، (b) نظام تداخل براغ.

3 - الخصائص فوق الصوتية والضوئية لبلورة أحادية المحور الضوئي [11,12]: 3 - 1 - الخصائص فوق الصوتية:

تحسب سرعة انتشار الأمواج فوق الصوتية عند انتشارها داخل بلورة (وتعرف عندئذٍ بالأمواج فوق الصوتية الحجمية، بخلاف الأمواج فوق الصوتية السطحية التي تنتشر على سطح البلورة)، من علاقة كريستوفل والتي تعطى بالعلاقة التالية [7,9,10,11]:

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

وفيها رموز كريستوفل (Γ_{il}) التي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\Gamma_{il} = \sum_j \sum_k c_{ijkl} n_i n_k \quad (3)$$

علماً أنه نتيجة للتناظر تتحقق بين المركبات العلاقات التالية:

$$\Gamma_{32} = \Gamma_{23} , \Gamma_{31} = \Gamma_{13} , \Gamma_{21} = \Gamma_{12}$$

كما أن (n_i, n_k) هي احداثيات اتجاه انتشار الموجة فوق الصوتية داخل البلورة و (C_{ij}) ثوابت المرونة للبلورة وتقدر بـ (N/m^2) و (ρ) الكتلة الحجمية للبلورة وتقدر بـ (Kg/m^3).

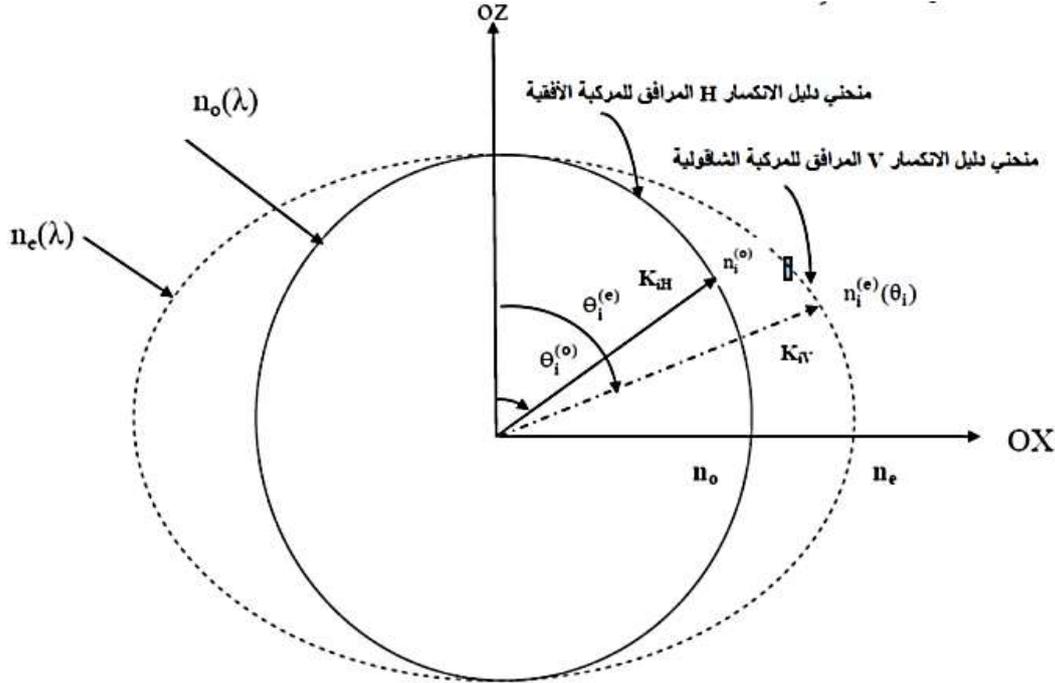
وقد أثبت الباحثون أن سرعة الموجة فوق الصوتية في المستوي (oxy) تعطى بالعلاقة التالية [9]:

$$v_a = \sqrt{\frac{(c_{11} - c_{12}) + (2c_{44} - c_{11} + c_{12})\sin^2\alpha}{2\rho}} \quad (4)$$

حيث تمثل (α) الزاوية بين محول الأمواج فوق الصوتية والمحور المرجعي [110] للبلورة.

3 - 2 - الخصائص الضوئية لبلورة أحادية المحور الضوئي:

يبين الشكل (4) منحني قرائن الانكسار لبلورة أحادية المحور الضوئي والذي يمكن من خلاله حساب قيمة قرينة الانكسار فوق العادي (الشاذة).



الشكل (4): قرائن الانكسار المرافقة لحالتي الاستقطاب في بلورة أحادية المحور الضوئي.

يمكن من الشكل (4) استنتاج علاقات قرائن الانكسار العادية والشاذة وذلك من خلال العلاقات التالية [6]:

قيمة قرينة الانكسار الشاذة $n_i^{(e)}$

$$n_i^{(e)}(\theta_i) = \frac{n_o(\lambda)n_e(\lambda)}{\sqrt{n_e^2\cos^2\theta_i + n_o^2(\lambda)\sin^2\theta_i}} \quad (5)$$

أما قيمة قرينة الانكسار العادية $n_i^{(o)}$

$$n_i^{(o)} = n_o(\lambda) \quad (6)$$

4 - خصائص التفاعل فوق صوتي - ضوئي داخل بلورة غير متماثل المناحي:

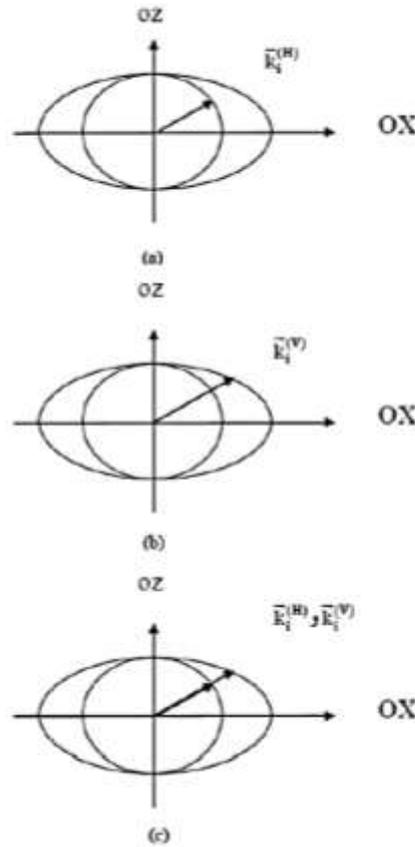
بفرض أن الأمواج الضوئية وفوق الصوتية أمواج مستوية، عندها يمكن أن نكتب:

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} n_i \quad , \quad k_a = \frac{2\pi}{v_a} f_a \quad (7)$$

حيث: λ_i طول الموجة الضوئية في الفراغ الحر و v_a سرعة الموجة فوق الصوتية داخل وسط التداخل و f_a تردد الإشارة المطبقة على محول الأمواج فوق الصوتية.

تنص النظرية الأساسية لانتشار الضوء داخل بلورة غير متماثلة المناحي وأحادية المحور الضوئي مثل بلورة (TeO₂) وبلورة (Hgcl₂) (Calomel) على ما يلي:

ينقسم الشعاع الضوئي (\vec{k}_i) لموجة ضوئية أحادية اللون واردة بزواوية ما بالنسبة للمحور الضوئي للبلورة وباستقطاب ما عند دخولها وسطاً غير متماثل المناحي وأحادي المحور الضوئي وفق النمطين الأساسيين للانتشار، أي إلى موجة ضوئية مستقطبة أفقياً ($\vec{k}_i^{(H)}$) أو ($\vec{k}_i^{(o)}$) وموجة مستقطبة شاقولياً ($\vec{k}_i^{(V)}$) أو ($\vec{k}_i^{(e)}$)، لذلك عندما يرد شعاع ضوئي باستقطاب شاقولي تماماً يكون لدينا ($\vec{k}_i \equiv \vec{k}_i^{(V)}$)، أما عند وروده بشكل أفقي فيكون ($\vec{k}_i \equiv \vec{k}_i^{(H)}$). يبين الشكل (5) مبدأ اقتران طاقة الموجة الضوئية وفقاً لأحد أنماط الانتشار (H) فقط أو (V) فقط أو (H&V) معاً [12,13].



الشكل (5): اقتران طاقة الموجة الضوئية وفقاً لأنماط الانتشار في الحالات التالية: (a) موجة ضوئية واردة باستقطاب أفقي و (b) باستقطاب شاقولي و (c) باستقطاب اهليلجي.

5 - مردود التفاعل فوق صوتي - ضوئي:

يعرف مردود التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، حيث يرمز له بالرمز (η)، على أنه النسبة بين الشدة الضوئية المنحرفة على جبهة الموجة فوق الصوتية (I_d) إلى الشدة الضوئية الواردة (I_i) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta = \frac{p}{p_o} \frac{\sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{p}{p_o} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi} \right)^2} \right]}{\frac{p}{p_o} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi} \right)^2} \quad (8)$$

حيث: (p) هي الاستطاعة المطبقة على محول الأمواج فوق الصوتية بينما (p_o) تمثل الاستطاعة اللازم تطبيقها على محول الأمواج فوق الصوتية لحرف كامل شدة الشعاع الليزري الوارد وتعلق قيمتها بأبعاد محول الأمواج فوق الصوتية، ونوع البلورة المستخدمة، وطول موجة الشعاع الليزري الوارد، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$p_o = \frac{\lambda^2 H}{2M^2 W}$$

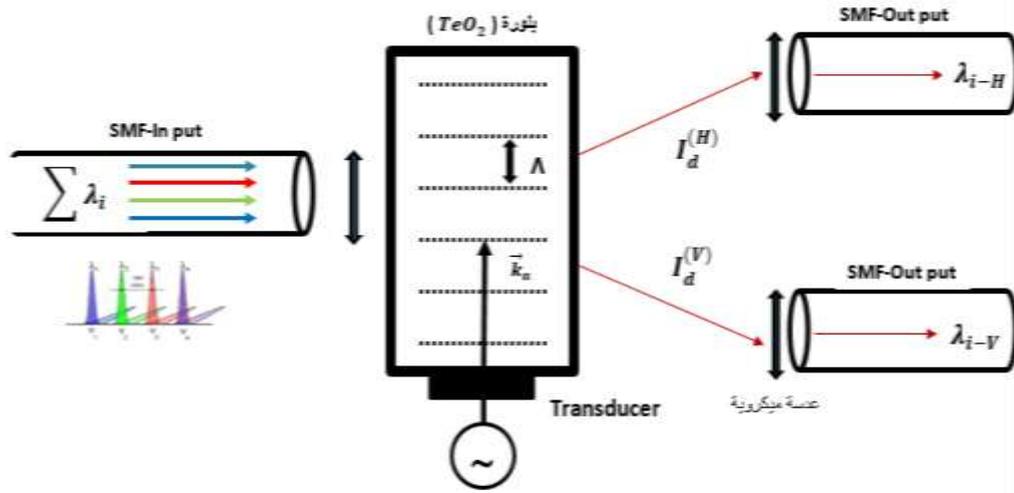
حيث أن: (λ) طول موجة الشعاع الليزري الوارد، (W, H) طول وعرض محول الأمواج فوق الصوتية المستخدم لتوليد الموجة فوق الصوتية عرضانية الاستقطاب، (M) عامل الاستفادة للبلورة المستخدمة ويعطى من أجل كل نوع من البلورات الممكنة الاستخدام لتحقيق التفاعل فوق صوتي - ضوئي.

يؤثر الحد $(\Delta\theta)$ في العلاقة (8) بشكل كبير على مردود التفاعل (η) ويمثل فرق الطور الناتج من حالة التفاعل المتزامن بين الموجة فوق الصوتية والضوئية وحالة التفاعل غير المتزامن حيث يمكن حسابه هندسياً بطرق متعددة.

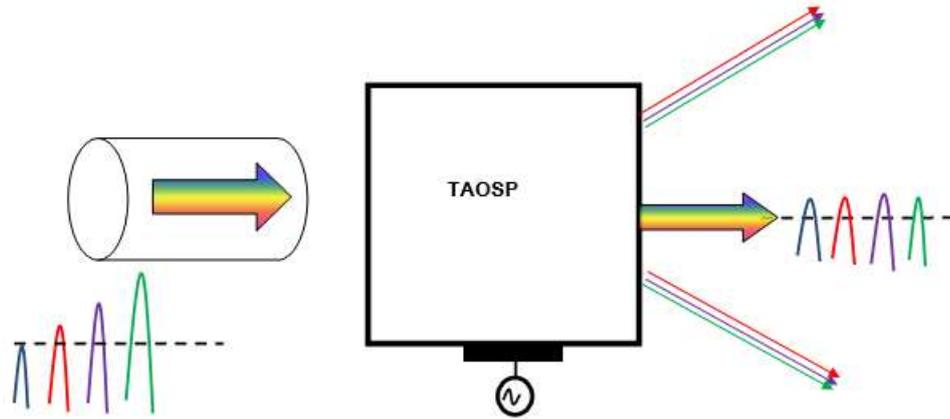
النتائج والمناقشة:

يبين الشكلان (6) و(7)، مخططاً صندوقياً لتطبيقات هامين عملياً ويحتاجان في عملهما إلى فاصل استقطاب فعال متحكم به إلكترونياً (القابل للتوليف بإشارة كهربائية). يمثل التطبيق الأول الشكل (6)، استخدام (TAOSP: Tunable Acousto optic separator of polarization) من أجل تطبيقات تقنية التجميع بتقسيم الاستقطاب، والتجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية (WDM-PDM) حيث (PDM: polarization Division Multiplexing) و(WDM: Wave length Division Multiplexing). بينما يستخدم في التطبيق الثاني (TAOSP) لتسوية الاستطاعة للإشارات الضوئية بعد خروجها من ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) وتعرضها إلى التوهين بقيم مختلفة حسب الطول الموجي الحامل لها (λ_i) كما هو مبين في الشكل (7). ويتكون المخطط المصمم في الشكل (6) من:

- 1- فاصل الاستقطاب (TAOSP).
- 2- مجموعة إشارات تنتشر داخل ليف ضوئي أحادي النمط (SMF) وفقاً لتقنية التجميع (WDM-PDM).
- 3- محول الأمواج فوق الصوتية (Transducer).
- 4- ليف الخرج الذي يتلقى الشعاع (o-ray).
- 5- ليف الخرج الذي يتلقى الشعاع (e-ray). بالإضافة إلى عدسات ميكروية لتكبير الحزمة الضوئية.

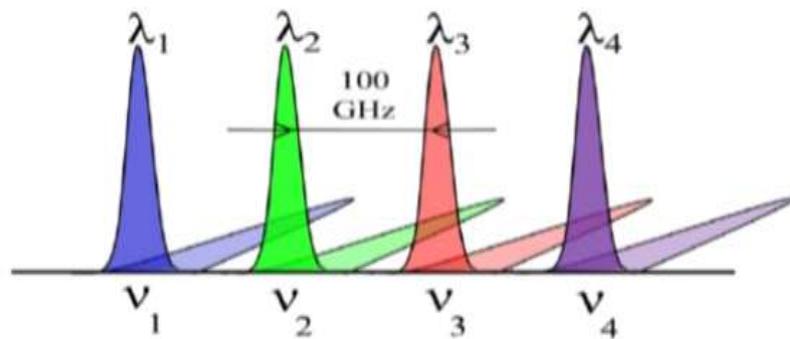


الشكل (6): مخطط صندوقي لفاصل الاستقطاب القابل للتوليف.



الشكل (7): تسوية الاستطاعة للحوامل الضوئية.

يبين الشكل (8) الإشارات المنتشرة عبر ليف الدخل بتقنية (WDM-PDM)، حيث يطلب من الفاصل المصمم انتقاء طول موجي معين (شعاع ليزري) وفصل مركبتي الاستقطاب لهذا الشعاع عن بعضهما البعض.



الشكل (8): شدات (WDM-PDM).

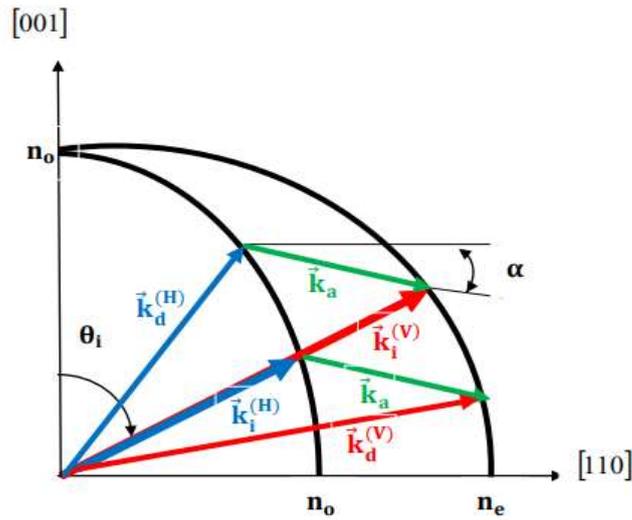
1 - معطيات البحث:

استند البحث إلى المعطيات التالية:

- البلورة المستخدمة كوسط تفاعل ثنائي أوكسيد التيلوريوم (TeO_2)، وهي بلورة أحادية المحور الضوئي شفافة ضمن نطاق عريض من الأطوال الموجية (300 nm – 50 nm).
- محول أمواج فوق صوتية من النوع (Y – 163)، قادر على توليد أمواج فوق صوتية عرضانية الاستقطاب حيث يتم التحكم بسرعة الموجة فوق الصوتية عن طريق الزاوية (α) بين محول الأمواج فوق الصوتية والمحور المرجعي [110] للبلورة (المحور الأبطأ للسرعة).

2 - الحسابات الرقمية لفاصل الاستقطاب الفعال (TAOSP):

تتخصص قيم الزاوية (α°) ضمن المجال ($2^\circ < \alpha \leq 14^\circ$) [9]، حيث أنه في حالة القيمة ($\alpha < 2^\circ$) تدخل البلورة ضمن منطقة (قرب المحور الضوئي) نشطة ضوئياً (Gyrotrop)، وفي حالة القيم ($\alpha > 14^\circ$) يصبح استخدام الموجة فوق الصوتية غير فعال بسبب التخميد الشديد. يبين الشكل (9)، مخطط بياني للتفاعل الثنائي فوق صوتي - ضوئي ضمن بلورة (TeO_2).



الشكل (9): مخطط هندسي (بياني) للتفاعل الثنائي فوق صوتي - ضوئي.

يتلقى فاصل الاستقطاب (TAOSP) شعاع ليزري باستقطاب إهليلجي في الحالة العامة، وطول موجة (λ_i) وبمجرد دخول الشعاع الليزري البلورة أحادية المحور الضوئي، وحسب مبدأ اقتران الطاقة، تنتزع طاقة الموجة الضوئية الواردة وفقاً لنمط الانتشار باستقطاب أفقي ($\vec{k}_i^{(H)}$) واستقطاب شاقولي ($\vec{k}_i^{(V)}$). وبوجود الموجة فوق الصوتية (\vec{k}_a) المولدة باستخدام محول الأمواج فوق الصوتية، يحدث تفاعل ثنائي وحسب مبدأ حفظ الطاقة يمكن أن نكتب:

$$\vec{k}_i^{(H)} + \vec{k}_a = \vec{k}_d^{(V)} \quad (9)$$

$$\vec{k}_i^{(V)} - \vec{k}_a = \vec{k}_d^{(H)} \quad (10)$$

تمثل المعادلتين (8) و(9) التفاعل الثنائي بين نمطي الانتشار للموجة الضوئية ($\vec{k}_i^{(H)}$) و($\vec{k}_i^{(V)}$) مع الموجة فوق الصوت (\vec{k}_a) حيث $k_a = \frac{2\pi}{V_a} f_a$ يحدث تبديل للاستقطاب بعد كل تفاعل كما هو مبين بوضوح على الشكل (9). و باستخدام المخطط الهندسي الموضح في الشكل (9) يمكن استنتاج قيمة ترددي التفاعل (f_1, f_2) اللازم

تطبيقهما على محول الأمواج فوق الصوتية لتحقيق عملية الفصل، حيث كل تردد يفصل مركبة من المركبتين الأساسيتين للاستقطاب و يعطى الترددين وفق العلاقتين:

$$f_1 = \frac{v_a}{\lambda} \left[n_{ie} \sin(\theta_i - \theta_b) - \sqrt{n_o^2 - n_{ie}^2 \cos^2(\theta_i - \theta_b)} \right] \quad (11)$$

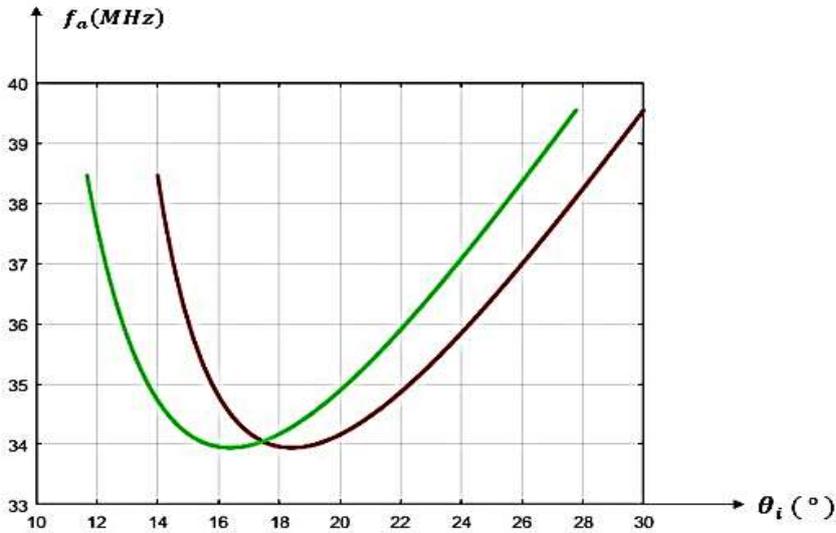
$$f_1 = \frac{v_a}{\lambda} \left[n_{de} \sin(\theta_{de} - \theta_b) - \sqrt{n_o^2 - n_{de}^2 \cos^2(\theta_{de} - \theta_b)} \right] \quad (12)$$

ويحسب مردود التفاعل الثنائي من العلاقات التالية، مع اختيار $(p = p_0)$ في العلاقة (8)، كما يلي:

$$\eta_{H \rightarrow V} = \frac{I_d^{(H)}}{I_i^{(V)}} = \frac{\sin^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\phi_{H \rightarrow V}}{\pi}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\Delta\phi_{H \rightarrow V}}{\pi}\right)^2} \quad (13)$$

$$\eta_{V \rightarrow H} = \frac{I_d^{(V)}}{I_i^{(H)}} = \frac{\sin^2 \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\phi_{V \rightarrow H}}{\pi}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\Delta\phi_{V \rightarrow H}}{\pi}\right)^2} \quad (14)$$

ويحل المعادلات (9) و(10) أما بالتربيع للتخلص من الأشعة أو الاسقاط الهندسي للأشعة في الشكل (9) وحساب $\Delta\phi$ هندسياً بالاستفادة من الشكل (9) والتعويض بعلاقة مردود التفاعل (13) و(14) ثم برمجة العلاقات باستخدام لغة برمجية عالية المستوى مثل (MATLAB) وهو أداة قوية جداً ذو دقة عالية للتطبيقات الهندسية والرياضيات والفيزياء، نستطيع حساب القيم التصميمية لفاصل الاستقطاب الفعال (TAOSP). و ببرمجة العلاقتين (11) و (12) نحصل على المخطط البياني الموضح بالشكل (10) و الذي يمثل تغيرات التردد المطبق على محول الأمواج فوق الصوتية بدلالة الزاوية (θ_i) ، كما يبين الشكل (11) نتيجة الحل المشترك للمعادلتين (13) و(14)، والتي تؤدي إلى إيجاد قيمة مردود التفاعل (η) ، وقيمة فرق الطور الناتج عن التفاعل غير المتزامن $(\Delta\phi)$

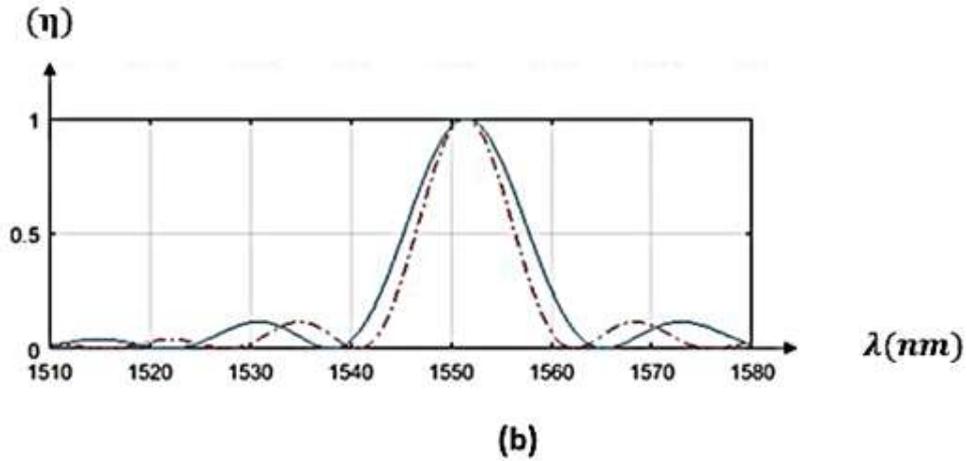
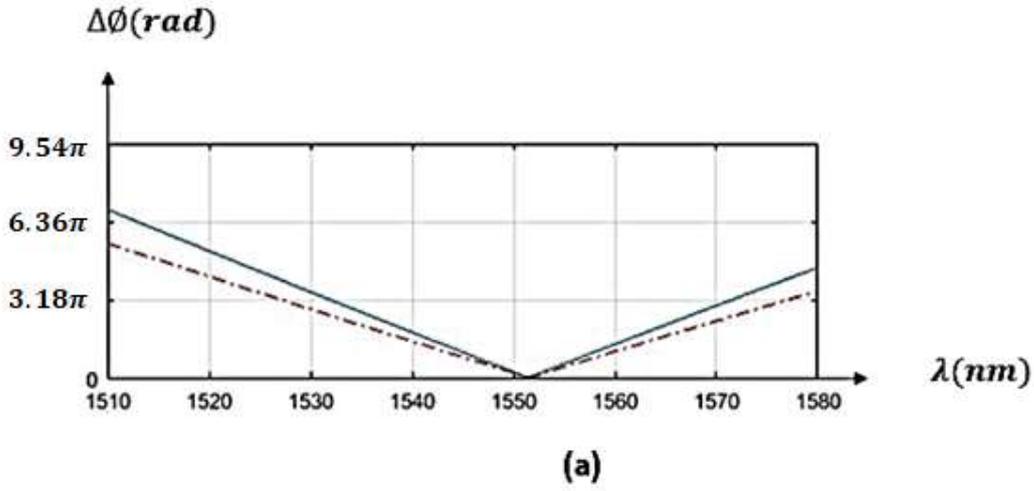


الشكل (10): تردد إشارة محول الأمواج فوق الصوتية (f_a) بتابعية زاوية الورد (θ_i) .

يتبين من الشكل (10)، (حيث يمثل الخط البياني الأخضر تغيرات التردد المطبق على محول الأمواج فوق الصوتية بدلالة الزاوية (θ_i) لفصل المركبة الأفقية للاستقطاب، بينما يمثل الخط البياني البني تغيرات التردد المطبق على محول الأمواج فوق الصوتية بدلالة الزاوية (θ_i) لفصل المركبة الشاقولية للاستقطاب)، أنه يمكن تحقيق التداخل الثنائي وبالتالي فصل مركبتي الاستقطاب للموجة الضوئية الواردة بطريقتين :

1- بإشارة واحدة ترددها $f_a(\text{MHz})$ ، يمثل الحل المشترك للمعادلتين (11) و(12)، تطبيق على محول واحد للأمواج فوق الصوتية بعد ضبط البلورة أمام الشعاع الضوئي الوارد بزاوية $(\theta_i=17.5^\circ)$.

2- بإشارتين مختلفتين في التردد بعد ضبط البلورة أمام الشعاع الضوئي بزاوية $(\theta_i=24^\circ)$ ويكون تردد الإشارة الأولى $(f_a=35.8\text{MHz})$ ، بينما يكون تردد الإشارة الثانية $(f_a=37\text{MHz})$.



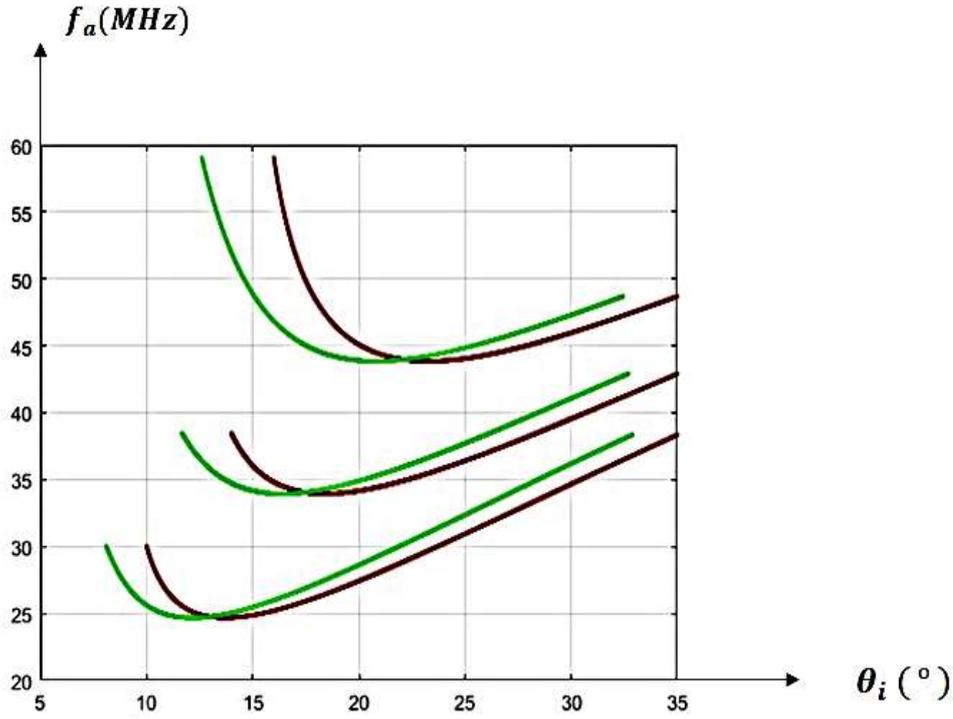
الشكل (11): فرق الطور للتفاعل الثنائي والمردود المرافق بدلالة الطول الموجي (λ) .

يبين الشكل (11 - a) والشكل (11 - b) تغيرات كلاً من فرق الطور للتفاعل الثنائي $(\Delta\phi)$ والمردود المرافق (η) بدلالة الطول الموجي (λ) على التوالي (حيث يدل الخط البياني المنقط على تغيرات كل من $(\eta, \Delta\phi)$ بدلالة الطول الموجي (λ) أثناء التفاعل الحاصل لفصل المركبة الأفقية للاستقطاب، بينما يدل الخط البياني المتصل على تغيرات كل من $(\eta, \Delta\phi)$ بدلالة الطول الموجي (λ) أثناء التفاعل الحاصل لفصل المركبة الشاقولية للاستقطاب). يظهر الشكل

(11) بوضوح أن تفاعلاً يحدث عند فرق طور بقيمة معدومة ($\Delta\phi=0$) عند الطول الموجي ($\lambda=1551\text{nm}$)، ويؤدي إلى مردود أعظمي (η_{\max}). ويلخص الجدول (1) النتائج التصميمية لفاصل استقطاب بتردد واحد وبتتردين مختلفين. جدول (1): المواصفات التصميمية لفاصل استقطاب بتردد واحد وبتتردين مختلفين.

		فاصل استقطاب بتردد واحد	فاصل استقطاب بتردين مختلفين
طول الموجة في الفراغ الحر	$\lambda(\text{nm})$	1551	1551
قرينة الانكسار العادية	n_o	2.18	2.18
قرينة الانكسار الشاذة	n_e	2.32	2.32
الزاوية بين المحول والمحور المرجعي	$\alpha(^{\circ})$	8	8
سرعة الموجة فوق الصوتية	$V(\text{m/s})$	677.9	677.9
زاوية ضبط فاصل الاستقطاب	$\theta_i(^{\circ})$	17.5	24
تردد الفصل	$f(\text{MHz})$	34	$f_1=37$ $f_2=35.8$

يبين الشكل (12) المواصفات التصميمية لفاصل استقطاب بتردد واحد (تردد مركزي)، من أجل مقاطع صوتية أخرى ضمن المجال الممكن ويلخص الجدول (2) نتائج المحاكاة.

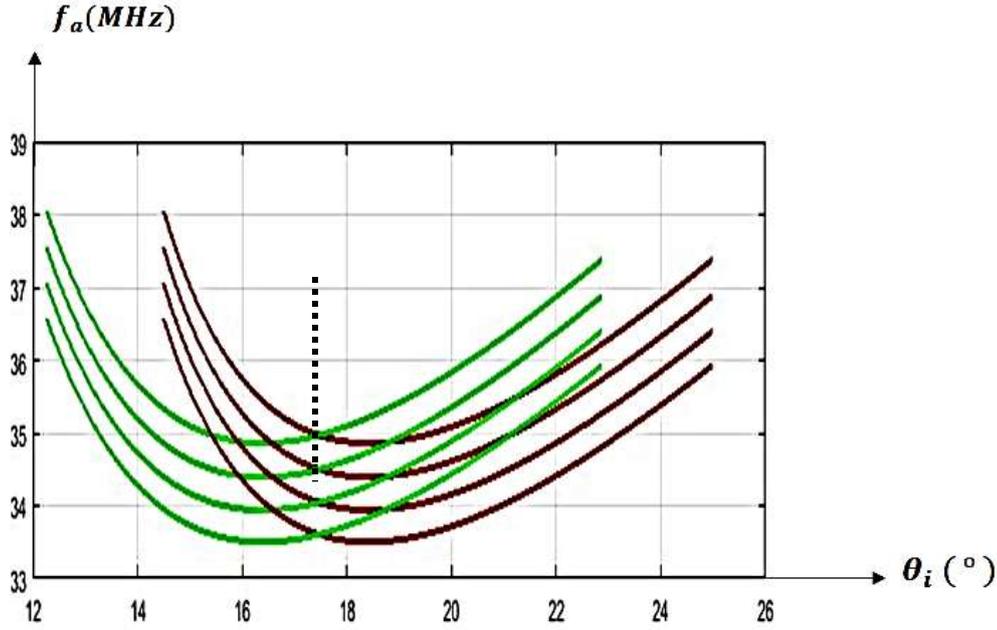


الشكل (12): المواصفات التصميمية لفاصل الاستقطاب بتردد واحد ومقاطع فوق صوتية مختلفة.

جدول (2): المواصفات التصميمية لفاصل استقطاب بتردد واحد ومقاطع فوق صوتية مختلفة.

		فاصل استقطاب بتردد واحد $\alpha_1=6^\circ$	فاصل استقطاب بتردد واحد $\alpha_2=10^\circ$
طول الموجة في الفراغ الحر	$\lambda(\text{nm})$	1551	1551
قرينة الانكسار العادية	n_o	2.18	2.18
قرينة الانكسار الشاذة	n_e	2.32	2.32
سرعة الموجة فوق الصوتية	$V(\text{m/s})$	652.1	709
زاوية ضبط فاصل الاستقطاب	$\theta_i(^\circ)$	13	22.1
تردد الفصل	$f(\text{MHz})$	24.7	44

يبين الشكل (13) خاصية هامة لفاصل الاستقطاب الفعال المقترح حيث يمكن ضبط فاصل الاستقطاب (TAOSP) بزواوية ($\theta_i=17.5^\circ$) امام الليف الضوئي الذي تنتشر فيه أطوال موجية مختلفة ويمكن عندها انتقاء أي طول موجي مرغوب وفصل استقطابه إلى المركبتين الأساسيتين (H,V) وذلك فقط بتغيير التردد المطبق على محول الأمواج فوق الصوتية دون الحاجة إلى إعادة ضبط الفاصل من أجل أطوال موجية مختلفة.



الشكل(13): انتقاء طول موجة وفصل الاستقطاب دون الحاجة لإعادة ضبط فاصل الاستقطاب.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تمكن البحث من خلال دراسة مرجعية دقيقة تحديد مشكلة تعاني منها تطبيقات حديثة جداً وتحتاج إلى تطوير عناصر ضوئية فعالة تواكب التطبيقات الحديثة في الفيزياء والاتصالات وغيرها. وبرهن البحث على فعالية استخدام فاصل الاستقطاب، الذي يعتمد على تقنية عالية الدقة كبديل للعناصر السلبية التي لا تستجيب لمتطلبات التطبيقات الحديثة. وحدد البحث القيم التصميمية لفاصل الاستقطاب من أجل مقاطع صوتية مختلفة.

بالعودة إلى النتائج تجدر الإشارة إلى أهمية الفاصل المصمم لعدة أسباب نذكر منها:

- إمكانية انتقاء طول موجي محدد في دخل الفاصل من بين (N) طول موجة دخل وهذه الميزة غير متاحة في العناصر السلبية.
- عدم الحاجة إلى ضبط فاصل الاستقطاب عند الانتقال من طول موجة ضوئية إلى طول موجة ضوئية أخرى، كما هو موضح في الشكل (13) حيث يضبط الفاصل على الزاوية ($\theta_i=17.5^\circ$).

التوصيات:

- يمكن اقتراح عدة توصيات للعمل عليها، ويمكن لكل منها أن يشكل محور بحثي مستقل، حيث يمكن تطوير فاصل الاستقطاب المصمم من خلال العمل على النقاط التالية:
- دراسة مدى التداخل بين الحوامل الضوئية المتجاورة، وهذا مهم جداً في تطبيقات الاتصالات الضوئية عالية السرعة وفقاً لمعايير الاتحاد الدولي للاتصالات.
 - دراسة أثر تغير طول محول الأمواج فوق الصوتية على أداء فاصل الاستقطاب.
 - استخدام بلورة أحادية المحور الضوئي من نوع آخر، مثل (caloml) ($HgCl_2$)، وهي بلورة ذات مواصفات ملائمة أكثر لتطبيقات الاتصالات.
 - دمج الاستقطاب (انجاز العملية المعاكسة للبحث) باستخدام تقنية التفاعل (Acousto-optic).

References:

- [1] SAPRIEL, J., CHARISSOUX, D., VOLOSHINOV, V., MOLCHANOV, V., *Tunable Acousto-optic Filters and Equalizers for WDM Applications*, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 20, 5, 2002.
- [2] SAKKOUR, A., KASTELIK, C. J., *Double Acousto-optic Interaction in paratellurite*, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, S1464-4258 (02), 2002, 315-319.
- [3] VOLOSHINOV V.B., MOLCHANOV V.Y., MOSQUERA J.C., *Spectral and Polarization analysis of optical images by means of acousto-optics*, Optics and Laser Technology, 28(2): 119-127, 1996.
- [4] BELKACEM, A., BORSALI, A.R., *A new full-duplex analog RoF transmission system for 5G/5G+ broadband mobile communication*, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, VOL 74(2023), NO1, 1-12.
- [5] AMMANN, E.O., MASSEY, G.A., *Modified Forms for Glan-Thompson and Rochon Prisms*, Electro-Optics Organization, Sylvania Electronic Systems, Western Division, Mountain View, California 94040 (Received 8 April 1968).
- [6] HUARD, S. *Polarization of light*. ISBN : 978-0-471-9653-7, March 1997.
- [7] DIEULESAIN, E., ROYER, D., *Ondes élastiques dans les solides*, tome 1, Propagation libre et guidée, 1996.
- [8] DIEULESAIN, E., ROYER, D., *Ondes élastiques dans les solides*, tome 2, Génération, interaction acousto-optique, applications, 1999.
- [9] KASTELIK, J.C., GHARBI, M., GAZALET, M.G., *Paratellurite: Propagation of the slow shear wave in the (001) plane. New formulations for the acoustic velocity and divergence*, Journal of Applied Physics, 84(2): 671-674, July 1998.
- [10] ARLT, G., SCHWEPPE, H., *Paratellurite, a new piezoelectric material*, Solid State Communications, 6: 783-784, 1968.
- [11] AULD, B.A. *Acoustic fields and waves in solids, Vol.1*. 1973.
- [12] GUPTA, N., VOLOSHINOV, V.B., KNYAZEV, G.A., KULAKOVA, L.A. *Tunable wide-angle acousto-optic filter in single-crystal tellurium*, J. Opt, Vol. 14, No. 3, p. 035502, Mar 2012.
- [13] MOLCHANOV, V.YA., CHIZHIKOV, S.I., MAKAROV, O.YU., SOLODOVNIKOV, N.P., GINZBURG, V.N., KATIN, E.A., KHAZANOV, E.A., LOZHKAREV V.V., YAKOVLEV, I.V., *Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulse shaping*, Applied Optics, Vol. 48, No. 7/1, pp. C118-C124, 2009.

- [14] ISSA, H., QUINTARD, V., Pérennou, A., SAKKOUR, A. *Double pass in acousto-optic tunable filter for telecommunication network*, Optical Engineering 53(7), 075103, July 2014.
- [15] NELSON, D.F., LAX, M., *Theory of the photoelastic interaction*, Physical Review B, 3(8): 2778-2794, April 1971.