

## نمذجة ومحاكاة مرشح ضوئي مولف فوق صوتي لتطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية

الدكتور عفيف صفور\*

نغم عباس\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 9 / 2014. قُبِلَ للنشر في 18 / 3 / 2015)

### □ ملخص □

يعد المرشح الضوئي من أهم العناصر المستخدمة في شبكات الاتصالات الضوئية الصرفة التي تستخدم التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM) Wavelength Division Multiplexing، يتضمن هذا البحث دراسة للمرشحات فوق صوتية- ضوئية (Acousto Optic Tunable Filter AOTF) ضمن وسط خطي غير متناظر المناحي (anisotropic)، التي تعتمد مبدأ التداخل فوق صوتي - ضوئي. تصف هذه المقالة نمذجة واختبار المرشح الضوئي الفوق صوتي AOTF باستخدام MATLAB/SIMULINK الذي يعد أداة قوية لنمذجة وتصميم النظم المختلفة، حيث تم التوصل إلى تصميم نموذج للمرشح AOTF، خلق كتلة (block) خاصة يمكن إضافتها إلى مكتبة المحاكاة الخاصة ببرنامج MATLAB، واختبار أداء هذا المرشح من حيث قدرته على انتخاب طول موجة معين من عدة أطوال موجية مجمعة بتقنية التجميع بتقسيم طول الموجة WDM، ودراسة تأثير تردد الموجة فوق الصوتية، سرعتها، خصائص الكريستال المستخدم في تصنيعه وغيرها من البارامترات في طول الموجة المنتخبة.

**الكلمات المفتاحية:** ألياف ضوئية- التجميع بتقسيم طول الموجة- المرشحات الضوئية- الأمواج فوق صوتية- خصائص الكريستال- التداخل ضوئي فوق صوتي مولف.

\*مدرس - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.  
\*\*قائم بالأعمال - قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Modeling and Simulation of Acousto-Optic Tunable Filter For WDM Applications

Dr. Eng. Afif sakkour •  
Nagham Abbas ••

(Received 4 / 9 / 2014. Accepted 18 / 3 / 2015)

### □ ABSTRACT □

Optical filter is one of the most accurate and important elements in pure optical communication network which uses wavelength division multiplexing (WDM). This research includes studying Acousto Optic Tunable Filter (AOTF) in linear anisotropic medium, which depends on the interaction principle between optical waves and acoustic waves.

This paper describes simulating and testing the AOTF in MATLAB/Simulink software which is a strong tool for simulating and designing various systems. We have achieved an AOTF model, and created special block which could be added to MATLAB Simulink Library. We have also evaluated the performance of this filter and its ability to select one wavelength between the set combined by WDM. Moreover, we have studied the effect of acoustic wave frequency, its velocity, the properties of the crystal used in manufacturing it, and other influent parameters, along the selected wavelength.

**Key words:** Optical fiber- Wavelength Division Multiplexing- Optical Filter- Ultrasound Wave- Crystal Properties- Acoustic Optic Interaction.

---

•Assistant Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

••Academic Assistant, Department of Communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

أظهرت الأبحاث العلمية منذ عدة سنوات أن إرسال المعلومات بواسطة الضوء ضمن القنوات الضوئية هو الحل لتجاوز حدود الكابلات النحاسية مما شجع على تطوير البنية التحتية لأنظمة الاتصالات الضوئية. إن استخدام تقنية تجميع الإشارات الضوئية بتقسيم طول الموجة WDM مع تحسين العناصر والتجهيزات الضوئية يمثل الحل الأفضل لزيادة سعة شبكات الاتصالات بالألياف الضوئية حتى مرتبة الـ  $1 \text{ petabit/sec}$ . يبين الشكل (1) الوصلة الهابطة للشبكة الضوئية التي تعتمد تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة WDM والتي يصل فيها الليف الضوئي حتى منزل المشترك. تعرف WDM بأنها التكنولوجيا التي تجمع عدة إشارات حاملة ضوئية على ليف ضوئي واحد أي إرسال عدة قنوات بخط نقل واحد. من الممكن اليوم إرسال 160 طول موجة مختلف في ليف واحد بنفس الوقت، لأن كل قناة تحمل مجموعتها من الإشارات اللاسلكية RF المتعددة، واستناداً إلى هذا تم تصنيف التجميع بتقسيم طول الموجة إلى عدة أنواع:

- 1- Conventional WDM: يمكنها أن تجمع ما يصل حتى 16 قناة في نافذة النقل الثالثة (C-band) من ألياف السيليكا حول 1550nm، حيث الفاصل بين القنوات المتجاورة 1000GHz أو تقريباً 0.8nm.
  - 2- Dense WDM (DWDM): تدعى هذه التقنية التجميع الكثيف بتقسيم الطول الموجي فهي طريقة موسعة من أجل الحصول على ساعات معطيات كبيرة جداً كالمطلوبة في شبكات توصيل الانترنت، وفيه يصل عدد القنوات المجمعة إلى 40 والتباعد بين القنوات 100GHz تقريباً 0.8nm.
  - 3- Coarse WDM (CWDM): التجميع الخشن، يوفر 16 قناة على ليف وحيد باستخدام كامل الحزمة الترددية ما بين (1310nm – 1610nm)، وفاضل (فراغ) القناة كبير يصل حتى 20 nm [1].
- يسمح القارن  $1 \times N$  المبين بالشكل (1) بتوزيع كل أطوال الموجة الضوئية المرسل (الحوامل الضوئية) من المقسم الذي يحوي الوحدة (OLT: Optical Line Terminal) والتي تضم تجهيزات الإرسال والاستقبال الضوئية إلى كل المشتركين في الشبكة.
- يتم تزويد المشترك في الشبكة الضوئية بوحدة النفاذ الضوئية (ONU: Optical Network Unit) والتي يشكل المرشح الضوئي عنصر الاستقبال فيها الذي يقوم بانتخاب طول موجة ضوئية مرغوب من بين N طول موجة في الدخل [2].

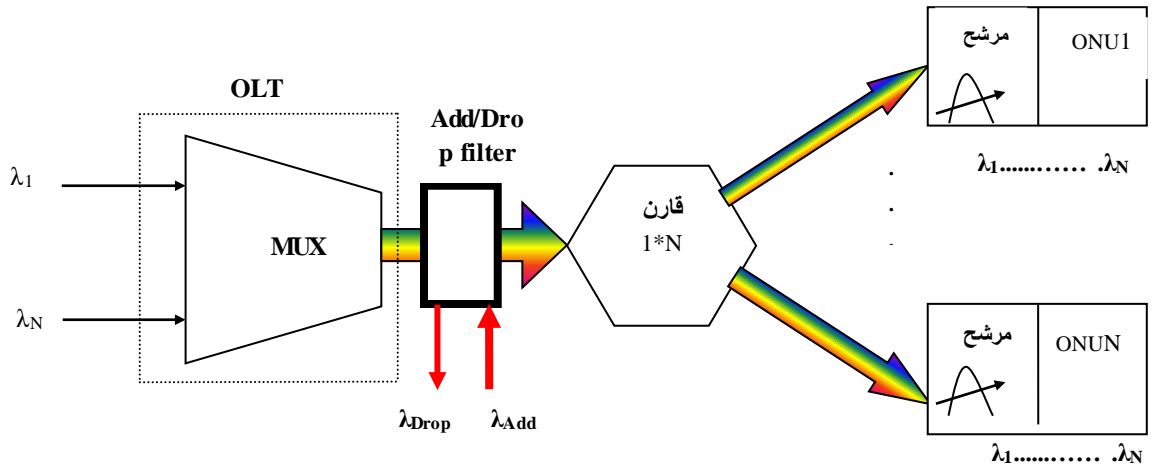
يمكن للمرشح المدروس أيضاً أن يقوم بدور عنصر حذف/ إضافة في عقد الشبكات الضوئية.

توجد تقنيات متعددة لتصميم المرشحات الضوئية من أهمها: [3,4]

1. Fabry Perot Interferometer Tunable Filter.
2. The Mach – Zehnder Interferometer.
3. Arrayed Waveguide Grating.
4. Fiber Bragg Gratings.
5. Electro-Optical Tunable Filters.
6. Acousto-Optic Tunable Filters.

تجدر الإشارة إلى أن إنتاج وحدات نفاذ ضوئية ONU بكميات تجارية يقتضي توحيد البنية العامة لها ويجب ألا يقتضي تبديل النافذة الضوئية المستخدمة إجراء تبديل للمرشح الضوئي أي تبديل لوحدة النفاذ الضوئية، ومن هنا تأتي أهمية الأبحاث والدراسات للبحث عن التقنية الأنسب.

- تعتبر تقنية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية تقنية واعدة وتتحصر أهمية المرشحات الضوئية التي تعتمد هذه التقنية وبالتالي أهمية البحث في مواصفات المرشح AOTF والتي يمكن تلخيصها في النقاط التالية:
- (i) عدم الحاجة إلى تحويل ضوئي / كهربائي أو العكس.
  - (ii) إمكانية الوصول التتابعي (sequential) أو العشوائي (random) لأي طول موجة في تقنية WDM وأنواعها.
  - (iii) العمل ضمن طيف يغطي النوافذ الضوئية الحالية والمستقبلية.
  - (iv) عدم الحاجة إلى تبديل أو إعادة ضبط المرشح أمام الليف الضوئي عند تغيير النافذة الضوئية المستخدمة.



شكل (1): الوصلة الهابطة للشبكة الضوئية WDM

### أهمية البحث وأهدافه:

إن الهدف من البحث تصميم المرشح الضوئي فوق صوتي AOTF، باستخدام مبدأ التداخل ونمذجته باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB، ومن ثم اختبار أداءه للحصول على طول الموجة المطلوب انتخابه من خلال التحكم بقيم بارامترات المرشح، الموجة فوق الصوتية المؤثرة، والكريستال المستخدم في تصميمه.

وتكمن أهمية البحث من خلال إضافة عنصر إلى مكتبة المحاكاة الخاصة ببرنامج MATLAB/SIMULINK يمكن استخدامه في مجال الاتصالات الضوئية.

### طرائق البحث ومواده:

في هذا البحث، سنقوم بتقديم موجز للنظرية العامة للتداخل بين الأمواج فوق الصوتية والأمواج الليزرية. إن عملية النمذجة للعناصر الضوئية معقدة وتحتاج إلى معرفة شاملة بعدة اختصاصات هندسية كما تحتاج إلى معرفة بالفيزياء والكيمياء، لذا اعتمدنا على الخواص الفيزيائية للمواد المستخدمة في تصنيع هذه المرشحات، كما تم الاعتماد على خصائص الأمواج فوق الصوتية والضوئية.

تركز اهتمامنا على إيجاد نموذج محاكاة للمرشح الضوئي الفوق صوتي الذي يعتمد على نمط التداخل المدروس والمعادلات الرياضية التي تصف عمل هذه المرشحات باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB وإظهار النتائج التي تختبر أداء هذا النموذج.

### 1- تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي:

إن انكسار الضوء (Diffraction) من قبل موجة فوق صوتية والتداخل بين الأمواج فوق الصوتية (Ultrasonic) والأمواج الضوئية (Optical) هي ظواهر معروفة منذ زمن بعيد، لقد برهنت الأبحاث العلمية أنه عندما تنتشر موجة مرنة داخل سائل فإن هذا الأخير يتصرف كشبكة محيدة للضوء.

إن التطور الجوهري لنظرية التداخل (Acousto-Optic) أتى مع ظهور الليزر. الأشعة التي يطلقها الليزر والتي تتمتع بخواص فريدة من حيث طول موجتها وترابطها زمنياً ومكانياً، فتح لتكنولوجيا تداخلها مع الأمواج فوق الصوتية حقلاً واسعاً جداً من التطبيقات العملية، كما أن تقدم تكنولوجيا تصنيع محولات الطاقة (transducers) ذات الترددات العالية والبحث عن مواد كريستالية جديدة ذات صفات عالية التداخل ساهم وإلى حد كبير في تطوير هذه النظرية وتطوير التطبيقات العملية للتداخل بين الأمواج فوق الصوتية والأمواج الليزرية. [5]

يرتكز التداخل فوق صوتي - ضوئي على التحكم بإشارة ضوئية عن طريق استخدام إشارة فوق صوتية، بحيث تقوم هذه الأخيرة بتعديل قرينة انكسار الوسط المستخدم للتداخل (كريستال). إن عملية تعديل قرينة انكسار وسط التداخل تعرف تحت اسم فعل Photo-Elastic. تولد الموجة فوق الصوتية داخل الكريستال شبكة طوريه (phase-Bragg) بعرض  $L$  وبخطوة تساوي طول الموجة فوق الصوتية  $\Lambda_a$ . إن مرور موجة ضوئية بطول موجي  $\lambda_0$  في الفراغ الحر، عبر الكريستال (ذو قرينة انكسار  $n$ ) المستخدم كوسط للتداخل، يمكن أن تنحرف من قبل الشبكة الطورية المولدة بواسطة الموجة فوق الصوتية تحت عدة شروط [6, 7].

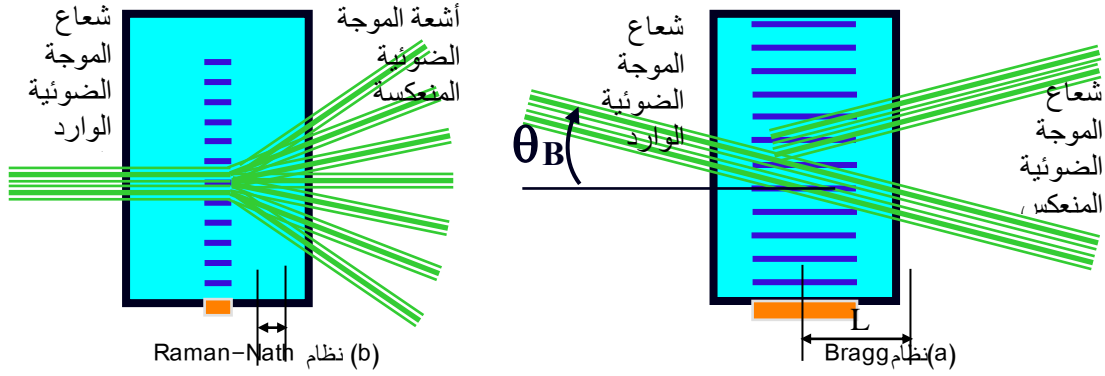
### 1-1- الأنماط الأساسية للتداخل فوق صوتي-ضوئي:

تبعاً لعرض محول الأمواج فوق الصوتية ( $L$ ) يوجد نمطان أساسيان للتداخل فوق صوتي - ضوئي: الأول ويسمى نظام Raman-Nath شكل (2a) والثاني نظام Bragg شكل (2b). يمكن التمييز بين النمطين باستخدام عامل  $Q$  يدعى بارامتر Klein-Cook والذي يعطى بالعلاقة [8]:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Lambda_a^2} \quad (1)$$

$\lambda_0$ : طول الموجة الضوئية الواردة،  $\Lambda_a$ : طول الموجة فوق الصوتية داخل الكريستال المستخدم،  $L$ : عرض محول الأمواج فوق صوتية،  $n$ : قرينة انكسار الوسط. [5, 8, 9]

يظهر في خرج خلية التداخل من أجل النمط الأول عدة أشعة منحرفة وبتباعد زاوي متماثل وتابع لتردد الإشارة فوق الصوتية، بينما يظهر في النمط الثاني شعاع ضوئي واحد منحرف كما هو موضح في الشكل (2b) وذلك عندما يكون عرض الشبكة كبيراً نسبياً، أي عندما تكون  $Q \geq 4\pi$ .



شكل(2): أنظمة التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والصوتية

## 2-1- مرود التداخل في نظام براغ (غير المتناظر):

في تطبيقات عديدة وخصوصاً في المرشحات الصوتية، نرغب في تركيز الطاقة على نمط منعكس واحد فقط كما في نظام براغ.

يعطى مرود التداخل في نظام براغ بالعلاقة التالية [10]:

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{P}{P_0} \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right)^2}}{\frac{P}{P_0} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right)^2} \quad (2)$$

حيث  $I_1$ : الشدة الصوتية للنمط المنحرف،  $I_0$ : الشدة الصوتية للنمط للشعاع الصوتي الوارد.

$P$ : استطاعة الموجة فوق الصوتية،  $P_0$  استطاعة الموجة فوق الصوتية اللازمة لعكس 100% الشعاع الصوتي الوارد عند التزامن.  $\Delta\phi$  فرق الطور الناتج عن تداخل غير متزامن بين الشعاع الصوتي الوارد وشعاع الموجة فوق الصوتية.

تعد عملية التداخل فوق صوتي- صوتي كعملية تصادم بين فوتون وفونون، إن انحراف الشعاع الصوتي وفق

نظام براغ يتطلب تطبيق مبدأ مصونية الطاقة، حيث إنه يمكننا تطبيق العلاقتين (3) و (4):

$$\omega_d = \omega_a \pm \omega_i \quad (3)$$

$$\vec{K}_d = \vec{K}_a \pm \vec{K}_i \quad (4)$$

الوارد. بينما  $\omega_d$ ،  $\omega_a$ ،  $\omega_i$  تمثل الترددات الزاوية للشعاع المنعكس والموجة فوق الصوتية والشعاع الوارد.  $\vec{K}_d$ ،  $\vec{K}_a$ ،  $\vec{K}_i$  تمثل على التوالي أشعة أطوال الموجة للشعاع المنعكس والموجة فوق الصوتية والشعاع الوارد. [11, 12]. التوالي.

## 2 - تصنيف الأوساط الصوتية (Classification of optical Medium):

يمكن تصنيف الأوساط الصوتية انطلاقاً من العلاقة التي تربط شعاع الانزياح الكهربائي  $\vec{D}$  مع شعاع الحقل

الكهربائي  $\vec{E}$  على شكل مصفوفة: [8,12]

$$\vec{D} = \varepsilon_0 [\varepsilon] \vec{E}, \quad \vec{D}_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} \vec{E}_j \quad (5)$$

$\varepsilon_{ij}$  عنصر متعلق بخصائص وسط الانتشار، ويمكن البرهان أن 3 معاملات فقط تكفي للتمييز بين الأوساط

الصوتية المختلفة مثل الكريستال.

$$\begin{bmatrix} Dx \\ Dy \\ Dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ex \\ Ey \\ Ez \end{bmatrix}$$

وحيث:  $n_i^2 = \varepsilon_i$ ، دليل الانكسار، حيث  $i = x, y, z$  واعتماداً على ذلك تصنيف أوساط الانتشار الضوئية إلى ثلاثة أنواع كما يلي: [13]

متناظر: isotropic كيفما جاءت الموجة الضوئية ترى نفس قرينة الانكسار أي قرينة الانكسار متساوية في جميع الاتجاهات (في اتجاه كل المحاور)  $Ex = Ey = Ez$ .

غير متناظر Anisotropic  $Ex = Ey \neq Ez$  وحيد المحور الضوئي.

غير متناظر Anisotropic  $Ex \neq Ey \neq Ez$  ثنائي المحور الضوئي.

وفق علاقات ماكسويل هناك تعامد بين شعاع الانزياح الكهربائي  $\vec{D}$  وجهة انتشار الموجة الضوئية  $\vec{K}$  وهناك تعامد بين  $\vec{H}$  وجهة انتشار الموجة الضوئية، ولكن الشعاع  $\vec{E}$  لا يتعامد مع جهة انتشار الموجة، لذا هناك زاوية ما  $\theta$  بين الحقل الكهربائي  $\vec{E}$  و  $\vec{D}$  أي  $\theta = \angle \vec{E} \cdot \vec{D}$  ( $\theta$  تتعلق بخصائص وسط الانتشار)، مع ملاحظة أن  $\theta = 0$  من أجل /Isotropic Medium/. من أجل اتجاه انتشار معين للموجة الضوئية داخل الكريستال يوجد حلان لقرينة الانكسار  $n_z$  بالتالي من هنا أتى مفهوم الانكسار الثنائي. يرافق كل قرينة انكسار موجة مستوية لها شعاع انزياح  $\vec{D}$  خاص بها وسرعة طور مرافقة  $\vec{V}$ .

### 3- الأمواج فوق الصوتية الحجمية:

يهتم علم الصوتيات الكريستالية بانتشار الأمواج فوق الصوتية في الأوساط الكريستالية غير متماثلة المناحي (Anisotropic) بشكل عام، وتشكل الأوساط المتناظرة (isotropic) حالة خاصة من هذه الأخيرة.

تكمن الأهمية الأساسية للأمواج فوق الصوتية في قدرتها على النفوذ في كل الأوساط حتى المواد الصامتة منه. يمكننا أن نلاحظ وجود نوعين رئيسيين من الأمواج فوق الصوتية في المواد الصلبة وكذلك في المواد السائلة

اللزجة جداً وذلك حسب نوع الانتشار: [14]

1. أمواج فوق صوتية حجمية (وفيها يتم انتشار الموجة فوق الصوتية داخل الوسط المعتمد).

2. أمواج فوق صوتية سطحية (وفيها تنتشر الموجة على سطح الوسط المعتمد).

وفي كلا النوعين يمكن تقسيم الأمواج فوق الصوتية حسب استقطابها إلى التالية:

1. الأمواج فوق الصوتية المستقطبة طولانياً: وفيها يكون شعاع الاستقطاب (منحى أو حركة أو انتقال جزيئات

المادة) موازياً لشعاع انتشار الموجة أي  $\vec{k} // \vec{u}$  حيث  $\vec{u}$ : شعاع استقطاب الموجة.  $\vec{k}$ : شعاع انتشار الموجة.

2. الأمواج العرضانية: (shear wave) وفيها يكون شعاع استقطاب الموجة فوق الصوتية  $\vec{u}$  عمودياً على

منحى الانتشار أي:  $\vec{u} \perp \vec{k}$ . ويمكن تقسيم النوع الثاني إلى قسمين:

أ. الأمواج فوق صوتية عرضانية الاستقطاب الشاقولية ونرمز لها بـ  $V$ .

ب. الأمواج فوق صوتية العرضانية الاستقطاب الأفقية ونرمز لها بـ  $H$ .

في الأوساط الغازية والسائلة المثالية (غير اللزجة) يمكن فقط للأمواج فوق الصوتية المستقطبة طولانياً أن

تنتشر، وذلك لأن جهود وقوى القص العرضانية غير قابلة للانتشار في هذه الأوساط. [15]

#### 4-اختيار وسط التداخل (الكريستال):

بشكل عام، تطرح عملية تصميم عناصر التداخل فوق صوتي - ضوئي بتطبيقاتها المختلفة مسألة اختيار الكريستال الذي يشكل الوسط الذي تحدث فيه عملية التداخل، يوجد في الطبيعة أنواع متعددة للكريستال الذي يمكن استخدامه كوسط للتداخل. يبين الجدول (1) قائمة بأهم أنواع الكريستالات ومجالات تمريره الأطوال الموجة الضوئية [13,16].

جدول(1): أهم أنواع الكريستالات المستخدمة في المرشحات الضوئية

نوع الكريستال	مجال تمرير أطوال الموجة بالميكرومتر
Quartz (كوارتز)	0.12-4.5
CaMoO <sub>4</sub>	0.4-4.5
LiNbO <sub>3</sub>	0.4-4.5
TeO <sub>2</sub> (الباراتولوريت)	0.36-4.5
TlAsSe <sub>3</sub>	17-1.26
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	20-0.4

يتميز الباراتولوريت (TeO<sub>2</sub>) من بين كل الأنواع المبينة في الجدول (1) بمواصفات نوعية من الناحية الضوئية، وفوق الصوتية - ضوئية تجعله أكثر أنواع الكريستالات استخداماً وخصوصاً في تطبيقات الاتصالات والالكترونيات.

#### 4-1-الخصائص الضوئية للكريستال TeO<sub>2</sub>:

يعد الباراتولوريت (TeO<sub>2</sub>) كريستالاً شفافاً جداً ضمن نطاق واسع من أطوال الموجة الضوئية 300nm-5µm يغطي نوافذ الاتصالات الضوئية الحالية والمستقبلية وهو كريستال غير متماثل المناحي ضوئياً وأحادي المحور الضوئي يملك قرينتي انكسار مناظرتين للاستقطاب الأفقي والعمودي ويبين الجدول(2) قيم قرائن الانكسار ضمن عدة نوافذ ضوئية [17].

جدول(2): قيم قرائن الانكسار للكريستال TeO<sub>2</sub>

λo(µm)	no	ne
0.4416	2.3759	2.5494
0.5145	2.3111	2.4732
0.6328	2.2597	2.4119
0.8000	2.2262	2.3735
1.00	2.208	2.352
1.5	2.18	2.32

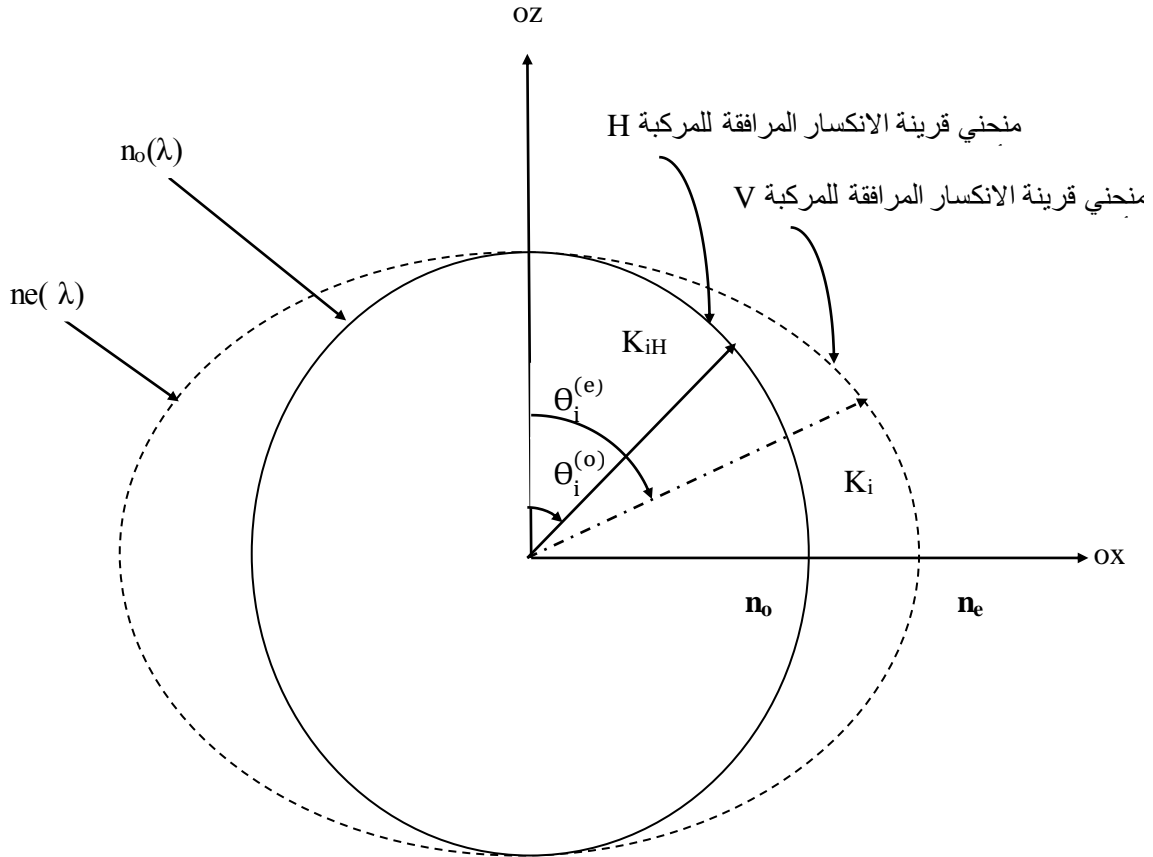
تتعلق قيم قرائن الانكسار أيضاً باستقطاب الموجة الضوئية المطبقة على الكريستال كما هو موضح في الشكل (3)، فعند ورود موجة ضوئية باستقطاب أفقي يكون لدينا:  $n_i^{(o)} = n_o \forall \theta_i$  أما عند ورود موجة ضوئية باستقطاب شاقولي يكون لدينا [18]:



$$n_i^{(e)}(\theta_i) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta_i + n_o^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (6)$$

من أجل أي اتجاه لشعاع الموجة الضوئية ترى الموجة قرينتي انكسار، قرينة انكسار عادية و قرينة الانكسار فوق العادية  $n_o(\lambda)$ : قرينة الانكسار العادية،  $n_e(\lambda)$ : قرينة انكسار فوق عادية، زاوية ورود الشعاع الضوئي بالنسبة للمحور الضوئي للكريستال OZ.

$$n_e(\lambda) = a_2 \lambda^2 - b_2 \lambda + c_2, \quad n_o(\lambda) = a_1 \lambda^2 - b_1 \lambda + c_1 \quad (7)$$



شكل (3) منحنيات قرائن الانكسار للكريستال TeO2 [6,10,13,19]

#### 2-4- الخصائص فوق الصوتية للكريستال TeO2:

نشرت مصفوفة الثوابت المرنة لثنائي أكسيد التيلوريوم (TeO2) من قبل الباحث Ochida، حيث درس انتشار الأمواج فوق الصوتية داخل الكريستال TeO2 وأثبت وجود موجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب تنتشر بسرعة منخفضة  $V_T=616\text{m/s}$  وفق المحور OX منصف المستوي (ox,oy) وموجة طولانية الاستقطاب تنتشر بسرعة  $V_L=1260\text{m/s}$  وفق المحور الضوئي OZ للكريستال. تحسب سرعة انتشار الموجة فوق الصوتية داخل الكريستال انطلاقاً من مصفوفة الثوابت المرنة  $C_{ij}(\text{N/m}^2)$  للكريستال. تم لاحقاً الاستفادة من الدراسة السابقة في تقنية التداخل فوق صوتي ضوئي في عملية تصميم المرشحات الضوئية المولفة باستخدام الموجة فوق الصوتية عرضانية الاستقطاب وفي تصميم الموجهات الضوئية (Optical Network) باستخدام الموجة فوق الصوتية طولانية الاستقطاب.

تعطى سرعة الموجة فوق الصوتية عرضانية الاستقطاب في مستوى التداخل (OX,OZ) بالعلاقة التالية: [13]

$$V_T = \sqrt{\frac{(C_{11}+C_{12})+(2C_{44}-C_{11}+C_{12}) \sin^2 \alpha}{\rho}} \quad (8)$$

حيث  $\alpha$  زاوية انتشار الموجة فوق الصوتية مفاصة بالنسبة للمحور OX.

$$\alpha = 0 \quad \Longrightarrow \quad V_T = 616m/s$$

يتم اختيار  $\alpha$  بحيث تكون سرعة الموجة فوق الصوتية بين القيمة الدنيا ولا تتجاوز  $741m/s$  أي  $0 \leq \alpha \leq 12^0$

وذلك بسبب تخادم الموجة فوق الصوتية عند استخدام ترددات مرتفعة.

$C_{ijkl}$ : الثوابت المرنة للمادة أو الوسط المعتبر.

$\rho$ : الكتلة الحجمية للوسط.

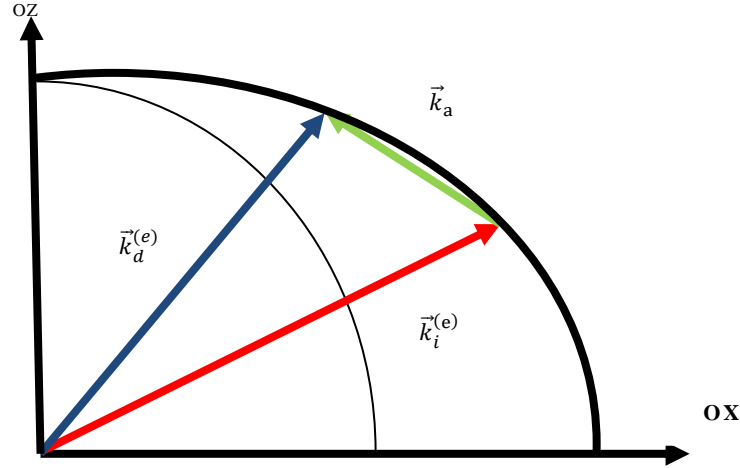
### 5 - أنماط التداخل فوق صوتي - صوتي من حيث نوعية استقطاب الموجة فوق الصوتية: [6, 13]

يوجد نمطين أساسيين للتداخل من حيث نوعية استقطاب الموجة فوق الصوتية المستخدمة وهما:

1- التداخل مع الحفاظ على استقطاب الموجة الضوئية ويحدث هذا النوع عند التداخل بين موجة صوتية

وموجة فوق صوتية باستقطاب طولاني. يبين الشكل (4) التداخل مع المحافظة على استقطاب الموجة الضوئية.

[6,10]



شكل (4) التداخل مع الحفاظ على استقطاب الموجة الضوئية (عدم تبديل منحنى قرينة الانكسار)

يمكن التعبير رياضياً عن حالة التداخل بالعلاقة الشعاعية التالية: [6,10,13]

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

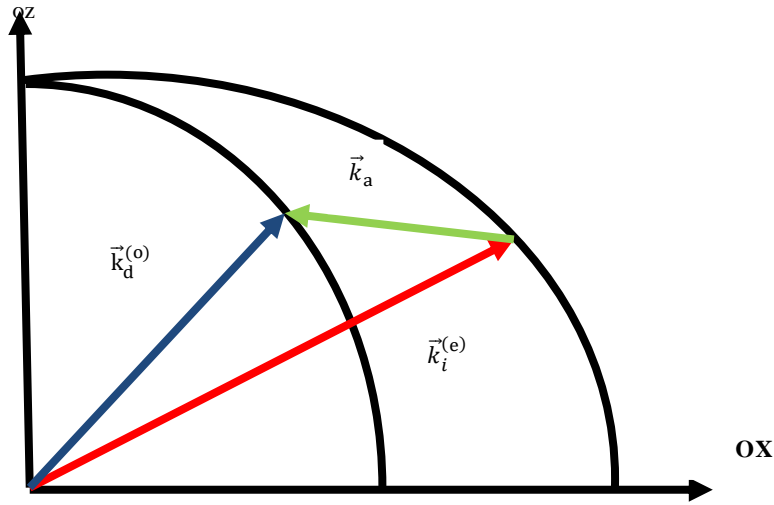
حيث:  $\vec{k}_i^{(e)}$ : شعاع الموجة الضوئية الوارد باستقطاب  $V$ ،  $\vec{k}_a$ : شعاع الموجة فوق الصوتية.  $k_a = \frac{2\pi f_a}{v}$

$\vec{k}_d^{(e)}$ : شعاع الموجة الضوئية المنحرف باستقطاب  $V$  (المحافظة على الاستقطاب)  $k_i^{(e)} = \frac{2\pi n_i(\theta_i)}{\lambda}$

حيث:  $\lambda$ : طول الموجة الضوئية المنتخب،  $n_o$ : قرينة الانكسار المرافقة للموجة الضوئية المستقطبة أفقياً،  $V$ :

سرعة الموجة فوق الصوتية،  $f_a$ : تردد الإشارة المطبقة على محول الأمواج فوق الصوتية.

$n_i(\theta_i)$ : قرينة الانكسار المرافقة للموجة المستقطبة شاقولياً.



شكل (5) التداخل مع تبديل استقطاب الموجة الضوئية (تغيير منحنى دليل الانكسار يقتضي تغيير الاستقطاب للموجة الضوئية)

2-التداخل مع تغيير الاستقطاب ويحدث هذا النوع من التداخل بين موجة ضوئية وموجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب. يبين الشكل (5) التداخل مع تبديل الاستقطاب للموجة الضوئية.

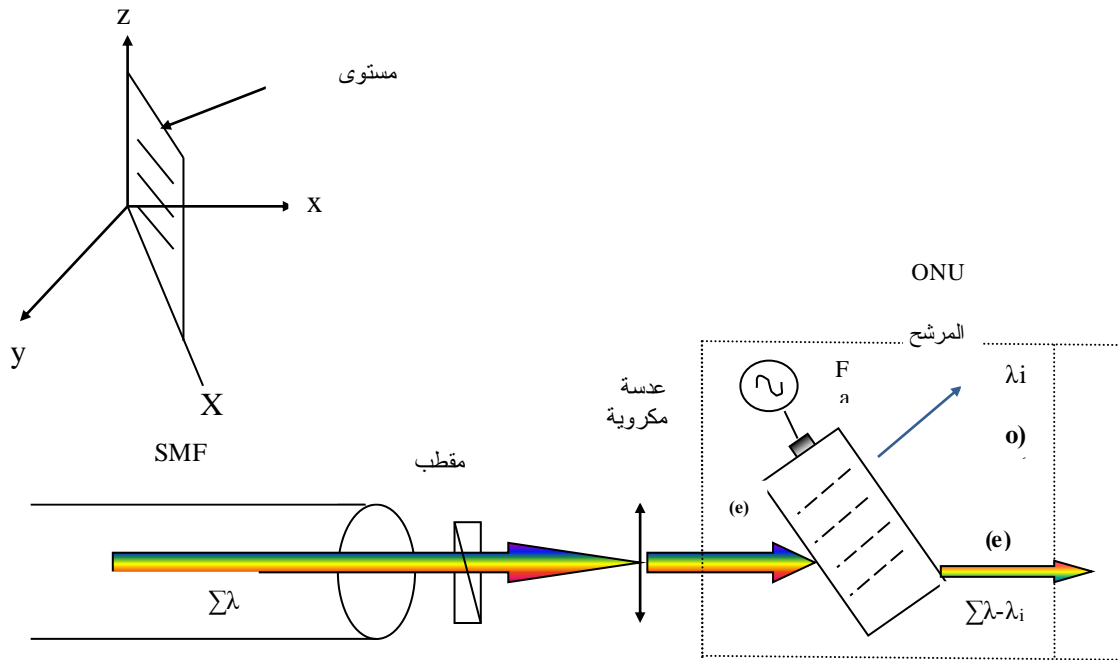
يمكن التعبير رياضياً عن حالة التداخل بالعلاقة التالية:

$$\vec{k}_i^{(e)} + \vec{k}_a = \vec{k}_d^{(o)} \quad (10)$$

حيث:  $\vec{k}_d^{(o)}$ : شعاع الموجة الضوئية المنحرف باستقطاب أفقي H، حيث  $k_d^{(o)} = \frac{2\pi n_o}{\lambda}$

6- دراسة وتحليل مرشح التداخل الضوئي الفوق صوتي :

يبين الشكل (6) مخططاً صندوقياً للمرشح AOTF والعناصر الملحقة به والتي يمكن أن تنفذ مخبرياً لمقارنة النتائج النظرية والمخبرية لتصبح عملاً متكاملًا.



شكل (6) المخطط الصندوقى المقترح لاختبار المرشح المدروس

يتلقى المرشح AOTF في الشكل (6) موجة صوتية بتباعد طيفي يتعلق بنوع تقنية التجميع المستخدمة (CWDM, DWDM, UDWM- Ultra Dense WDM).

يتم تحديد استقطاب الموجة الصوتية الواردة بواسطة مقطب Polarizer إلى استقطاب شاقولي ثم يتم تأبير الحزمة الصوتية بواسطة عدسة مكروية على المرشح AOTF.

تولد موجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب بسرعة  $V=704\text{m/s}$  داخل الكريستال  $\text{TeO}_2$  باستخدام محول أمواج فوق صوتية عن طريق تطبيق إشارة كهربائية جيبيية بتردد تابع لمواصفات الكريستال المستخدم وسرعة الموجة فوق الصوتية المولدة داخل الكريستال.

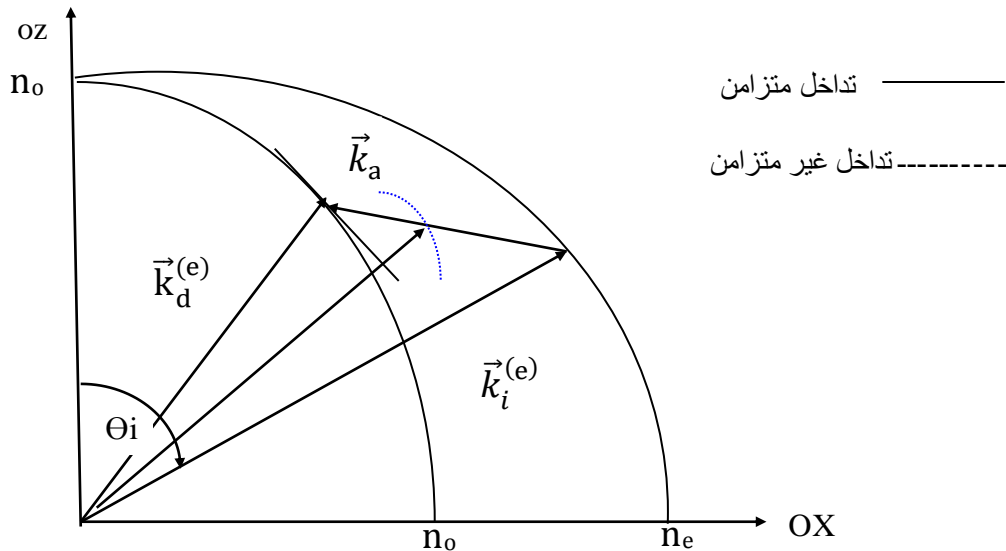
يمكن التعبير رياضياً عن التداخل بين الموجة فوق الصوتية والصوتية واستناداً إلى نظرية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والصوتية [7]. حيث يمكن توصيف حالة التداخل في الشكل (6) بالعلاقة الشعاعية السابقة (10).

بغية تسهيل الدراسة وحساب شروط التداخل المتزامن وغير المتزامن يستخدم عادةً المخطط الشعاعي كما هو موضح في الشكل (7).

انطلاقاً من العلاقة (10) أو من المخطط الشعاعي في الشكل (7) [10,19] يمكن استنتاج وحساب تردد الإشارة اللازم تطبيقها على محول الأمواج فوق الصوتية. [13, 20]

$$f_a = \frac{v(\alpha)}{\lambda} \left[ n_i(\theta_i) \sin(\theta_i - \alpha) - \sqrt{n_o^2 - n_i^2(\theta_i) \cos^2(\theta_i - \alpha)} \right] \quad (11)$$

تقتضي شروط التداخل المتزامن أن يقع شعاع الموجة الصوتية المنتخبة على منحنى قرينة الانكسار المرافق للموجة المستقطبة أفقياً (من أجل الحالة المدروسة) وإلا فإن التداخل يصبح تداخلاً غير متزامن نتيجة تغير بارامترات متعددة (زاوية ورود الشعاع الصوتي - تردد الموجة فوق الصوتية - تغير طول الموجة الصوتية).



شكل (7): التداخل المتزامن وغير المتزامن للحالة المدروسة [6,13,16]

يعطى  $\Delta\phi$  فرق الطور بين الشعاع الصوتي الوارد وشعاع الموجة فوق الصوتية الناتج عن التداخل غير المتزامن والذي يمكن استنتاجه من الشكل (7) بالعلاقة التالية: [21]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} w [n_o - n'] \quad (12)$$

حيث  $n_o$  قيمة قرينة الانكسار عند التداخل المتزامن،  $n'$  قيمة قرينة الانكسار عند التداخل غير المتزامن [20].

$$n' = \sqrt{n_o^2 + \left(\frac{\lambda f}{v}\right)^2 - 2n_o\left(\frac{\lambda f}{v}\right)\sin(\theta_i - a)} \quad (13)$$

W: عرض محول الأمواج فوق الصوتية.

### النتائج والمناقشة:

إن إيجاد نموذج محاكاة للمرشح الضوئي AOTF يمكن أن يستخدم في مكتبة Simulink لبرنامج MATLAB يقتضي دراسة النقاط التالية:

- نمذجة قرائن الانكسار للكريستال المستخدم كوسط تداخل.
- نمذجة مردود التداخل لمرشح AOTF.

#### 1- نمذجة قرائن الانكسار للكريستال المستخدم كوسط تداخل:

من أجل حساب قيم قرائن الانكسار  $n_o(\lambda)$ ،  $n_e(\lambda)$  عند أي طول موجة ضوئية، تم الاعتماد على القيم المنشورة عند بعض قيم أطوال الموجة الضوئية (الجدول 2) ومن أجل ذلك تم وضع برنامج بلغة الـ MATLAB والاستفادة من تابعي Polyval و Polyfit المتاحين في برنامج MATLAB لحساب القيم التقريبية لقرينتي الانكسار  $n_o(\lambda)$  و  $n_e(\lambda)$  عند أي طول موجة غير معطى، وتمت مطابقة نتائج النموذج الرياضي (المعادلة 7) مع الجدول (2) بأربع خانوات بعد الفاصلة وأعطى النموذج الرياضي المستنتج قيم دقيقة وحصلنا على المعادلتين:

$$\begin{cases} n_o = 16.78\lambda^6 - 87.8\lambda^5 + 186.5\lambda^4 - 207.4\lambda^3 + 128.5\lambda^2 - 42.6\lambda + 8.26 \\ n_e = 21.15\lambda^6 - 110.27\lambda^5 + 233\lambda^4 - 257.7\lambda^3 + 158.6\lambda^2 - 52.2\lambda + 9.7 \end{cases} \quad (14)$$

#### 2- نمذجة مردود التداخل لمرشح AOTF:

بدراسة انحراف نقطة التداخل المتزامن النقطة A في الشكل (5) تم استنتاج علاقة فرق الطور  $\Delta\phi$  الناتج عن التداخل غير المتزامن (العلاقة 15):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} w \left[ n_o - \sqrt{n_o^2 + \left(\frac{\lambda f}{v}\right)^2 - 2n_o\left(\frac{\lambda f}{v}\right)\sin(\theta_i - \alpha)} \right] \quad (15)$$

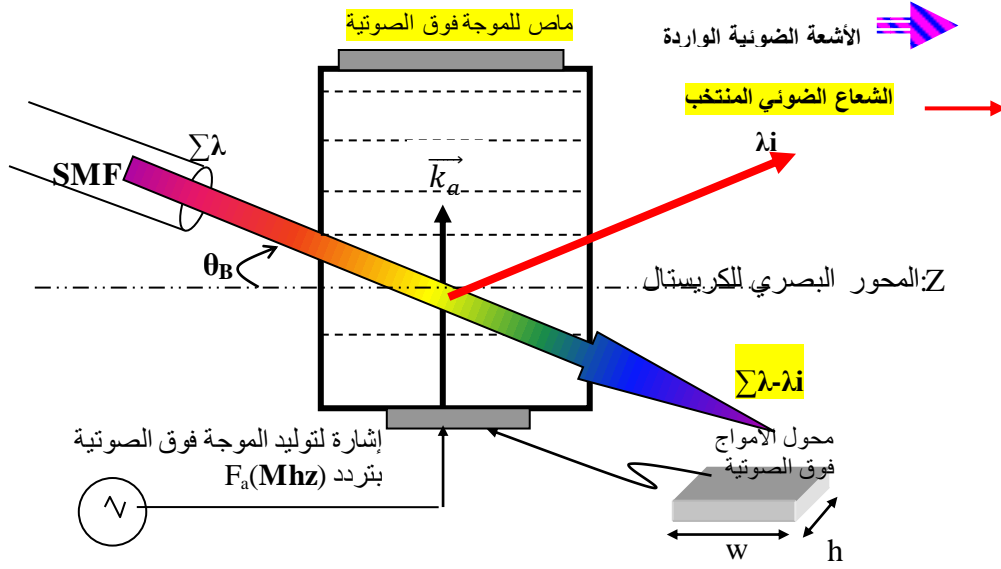
أما تردد التداخل للموجة فوق الصوتية التابع لكل من زاوية ورود الشعاع الضوئي مقاسة بالنسبة للمحور الضوئي للكريستال، وللنافذة الضوئية العاملة فيمكننا إيجادها من مخطط التداخل غير المتناظر وبحسب من العلاقة السابقة (11).

#### 3- بناء نموذج المحاكاة للمرشح الضوئي AOTF واختباره:

يقدم برنامج المحاكاة MATLAB بيئة متكاملة وشاملة لبناء نماذج وتقييم أداء مختلف الأنظمة وتنفيذ محاكاة متكاملة للتحكم بها وبالتطبيقات العاملة عليها والخدمات التي تقدمها.

تحتوي مكتبة SIMULINK كتل مختلفة تمكنا من بناء النظام الذي نريده واختباره ليعطينا تصوراً واضحاً عنه قبل البدء بتنفيذه على أرض الواقع، كما يمكن خلق كتل غير موجودة في هذه المكتبة. إن نمذجة المرشح AOTF تأخذ في الحسبان عدة نقاط منها نوع وسط التداخل (الكريستال)، سرعة الموجة فوق الصوتية وترددها، نمط التداخل، ليقوم بانتخاب طول موجة معين  $\lambda$  عند تطبيق موجة فوق صوتية ذات تردد fa على محول الأمواج فوق الصوتية والحصول على طول موجة مختلف عند كل تردد جديد.

إن وسط التداخل المستخدم من أجل عملية المحاكاة كما سبق وذكرنا هو كريستال  $\text{TeO}_2$  المتميز بالشفافية العالية ضمن المجال (800–1560nm) وهذا يناسب تطبيقات CWDM التي نعمل عليها في بحثنا، أما سرعة الموجة فوق الصوتية فيتم اختيارها بحيث يكون مردود التداخل (شدة الشعاع الضوئي في خرج المرشح) أعظماً حيث يتم حساب هذه السرعة من العلاقة (8) مع الأخذ في الحسبان القيم التالية للتوابت المرنة الخاصة بالكريستال المستخدم  $\rho=6000$ ,  $\alpha=10$ ,  $C_{11} = 5.57 \times 10^{10}$ ,  $C_{12} = 5.12 \times 10^{10}$ ,  $C_{44} = 2.65 \times 10^{10}$ .

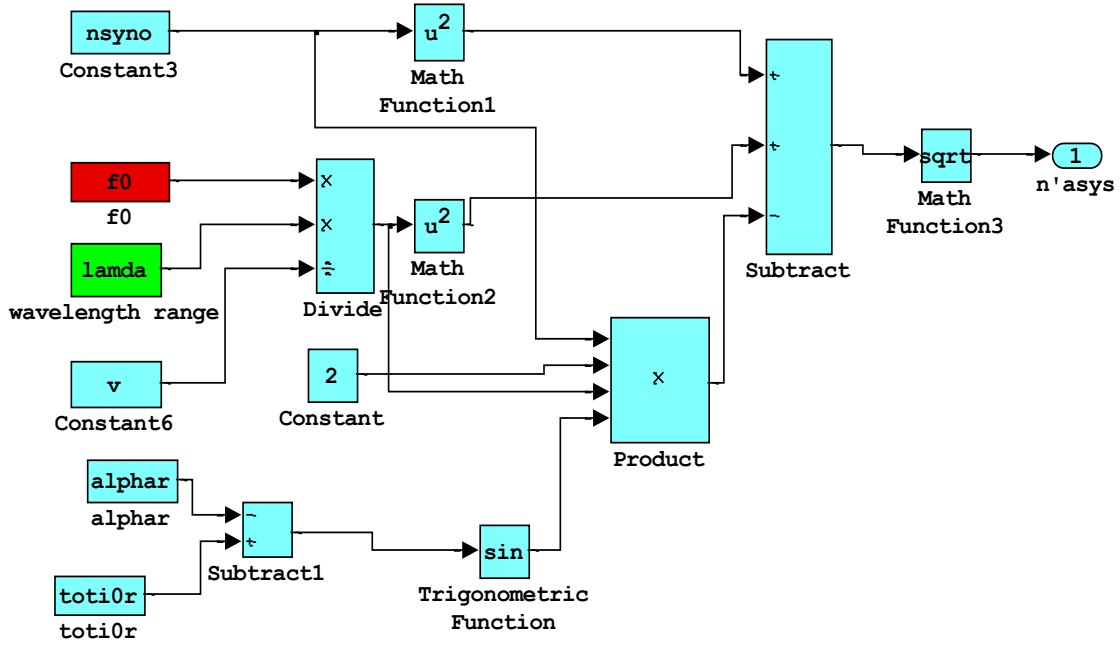


شكل(8):الشكل الهندسي للمرشح AOTF<sub>WDM</sub> [10,6]

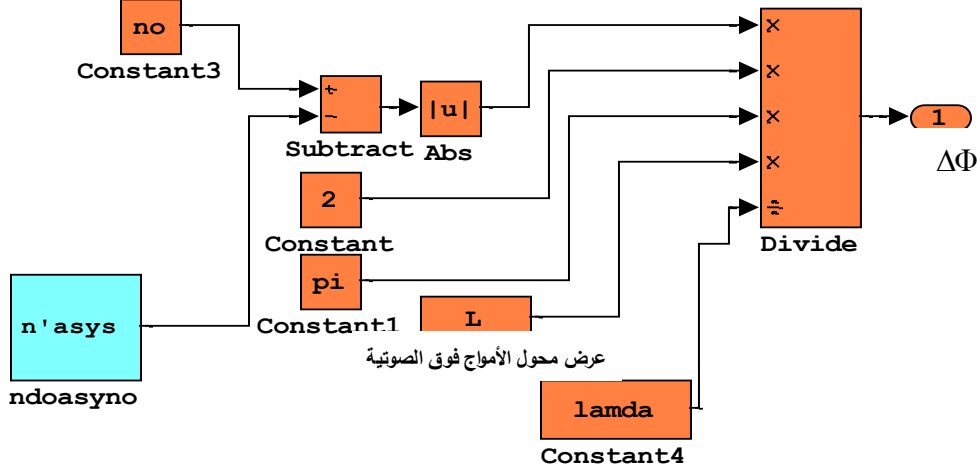
#### 4- مراحل بناء نموذج المرشح الضوئي AOTF:

بعد اختيار قيم البارامترات المحددة في الفقرة السابقة يتم حفظها في ملف نصي m-file في برنامج MATLAB ومن ثم بناء كتلة المرشح AOTF لتضاف كعنصر جديد في مكتبة SIMULINK الخاصة ببرنامج MATLAB كما هو موضح بالمراحل التالية:

- 1- بعد فتح نافذة نموذج فارغة تم سحب الكتل والعناصر المطلوبة لبناء نموذج المرشح من مكتبة commonly used block من أجل استدعاء التوابت الخاصة بالمرشح المصمم  $\theta, \emptyset, f_0, \lambda, n_o, n_e, v, \dots$
- 2- استخدام بلوك math function، وبلوكات product, subtract, divider من مكتبة math operation ثم وصل الكتل عن طريق خطوط الإشارة كما هو موضح بالمخططات التالية الشكلين (9-a)، (9-b)
- 3- نتابع بنفس الطريقة لاستكمال نموذج المرشح، ثم نقوم بتغليف النموذج في نظام فرعي عن طريق تحديد جميع الكتل واستخدام الأمر edit create subsystem من شريط القوائم، لنحصل على النموذج النهائي في الشكل (10-a).



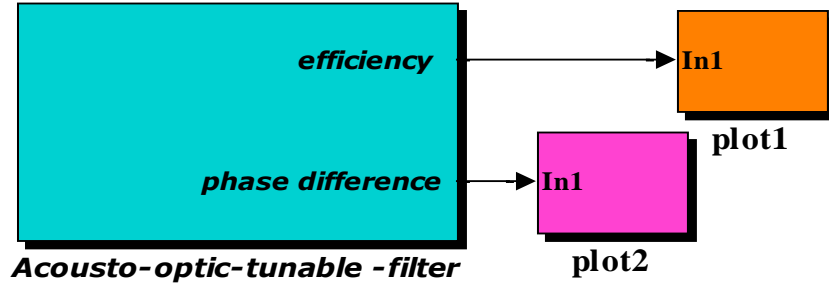
الشكل (9-أ) مخطط simulink لإيجاد نموذج قرينة الانكسار عند التداخل غير المتزامن



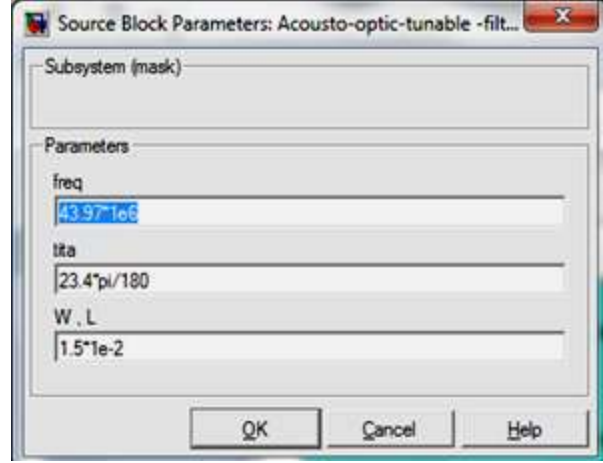
الشكل (9-ب) مخطط simulink لإيجاد نموذج فرق الطور الناتج عن التداخل غير المتزامن  $\Delta\Phi$

4- تحويل النظام الفرعي إلى نظام فرعي مقنع وذلك بتحديد كتلة النموذج واختيار الأمر Mask Subsystem من شريط القوائم، ومن خلال اللوحة Parameter نعرف وسطاء الكتل الموجودة في النظام الفرعي القابع تحت الكتلة المقنعة مثل زاوية ورود الشعاع الضوئي  $\theta$ ، عرض محول الأمواج فوق صوتية  $W$  أو  $L$ ، وتردد التداخل  $f_a$ ، وعند النقر المزدوج على كتلة المرشح AOTF نحصل بالتالي على مربع حوار الكتلة والذي يتضمن الموجهات الثلاثة كما هو موضح بالشكل (10-ب)، يمكن من خلاله التحكم بقيم هذه البارامترات.

5- لعرض نتائج المحاكاة تم تصميم الكتلتين plot1, plot2 باستدعاء برنامج فرعي تابعي تمت كتابته في ملف نصي m-file. وأخيراً تشغيل المحاكاة من الأمر Start → Simulation.



الشكل (10-a) نموذج المحاكاة النهائي للمرشح AOTF



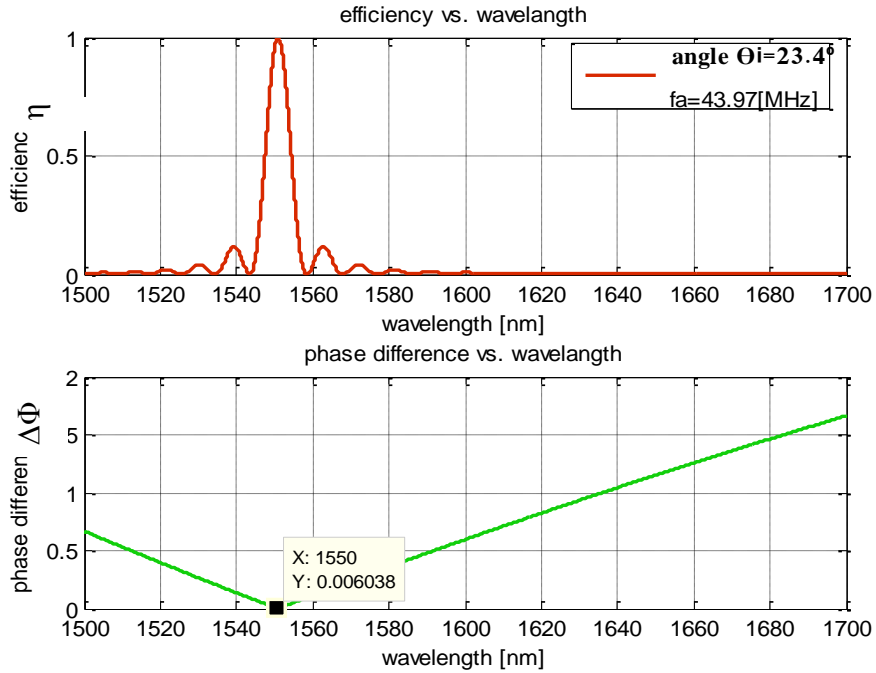
الشكل (10-b) مربع حوار الكتلة المقننة الموافق

6- حيث تستخدم الكتلة plot1 للحصول على الانتخائية الطيفية للمرشح أي رسم المردود كتابع لطول الموجة الصوتية للقنوات المجمعدة بتقنية WDM أما الكتلة plot2 فستستخدم لرسم فرق الطور  $\Delta\Phi$  كتابع لطول الموجة الصوتية.

#### 5- اختبار أداء المرشح AOTF:

تم اختيار قيم بارامترات المرشح المصمم بعد تجريب عدد من القيم المختلفة حتى وقع الخيار على القيم التالية:  $\Theta_i = 23.4^\circ$ ، تردد الموجة فوق الصوتية  $f_a = 43.97[\text{MHz}]$ ، و  $L = 1.5[\text{cm}]$ ، وباعتبار مجال الأطوال الموجية المجمعدة بتقنية CWDM والداخلية إلى المرشح تقع ضمن المجال  $[1480-1650]\text{nm}$  أي حول  $1550\text{nm}$  نحصل على خرج المرشح على طول الموجة المنتخبة  $\lambda = 1550\text{nm}$  المقابل للقيمة العظمى لمردود القناة المرشحة كما هو موضح بالشكل (11) نلاحظ من الشكل انه عندما تكون  $\Delta\phi = 0$  حيث  $f = f_a$  (تردد التداخل) فان المردود أعظمي، وقيمة الوريقات الجانبية أصغر، وعندما تزداد  $\Delta\phi$  فان مردود التداخل (شدة الشعاع الصوتي المنكسر إلى خارج الكريستال) يتناقص ويستمر بالتناقص حتى الصفر.





الشكل (11) منحنيات فرق الطور والمردود (الاستجابة الطيفية) ضمن النافذة C-Band

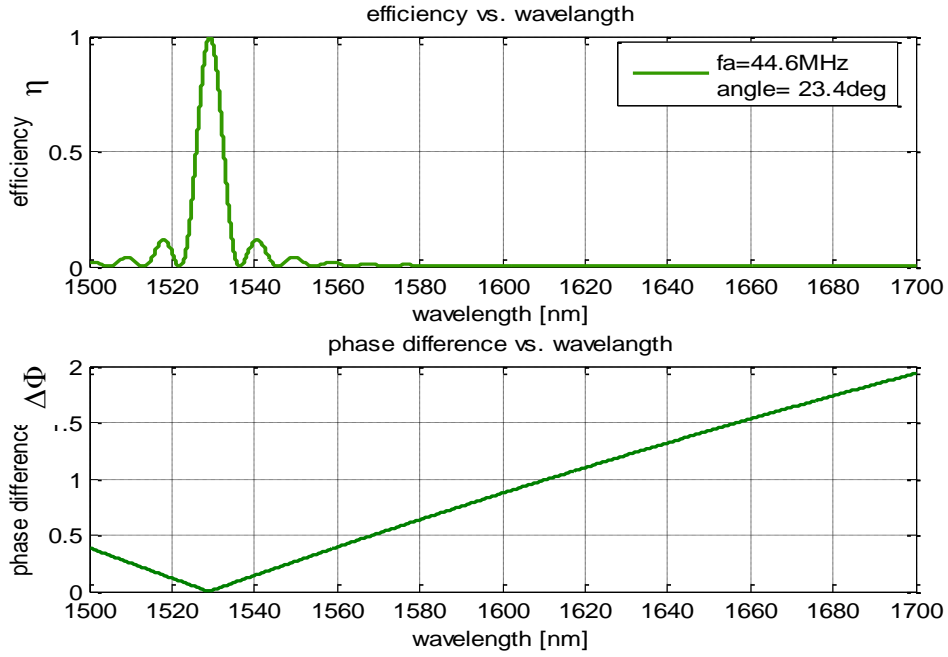
### 1-5- دراسة تأثير تردد التداخل fa في عمل المرشح:

بتثبيت قيم جميع البارامترات وتغيير تردد الموجة فوق الصوتية fa، يمكن انتخاب طول الموجة المطلوب من قبل المرشح AOTF المصمم، على سبيل المثال بأخذ قيمة fa=44.6[MHz] نجد أن طول الموجة المنتخبة  $\lambda=1530\text{nm}$  كما يبين الشكل (12)، و بالآلية نفسها يمكن التحكم بعمل المرشح لانتخاب أطوال الموجة المطلوبة.

يمكننا تنظيم جدول بقيم طول الموجة المنتخبة الموافقة لكل تردد للموجة فوق الصوتية المطبقة.

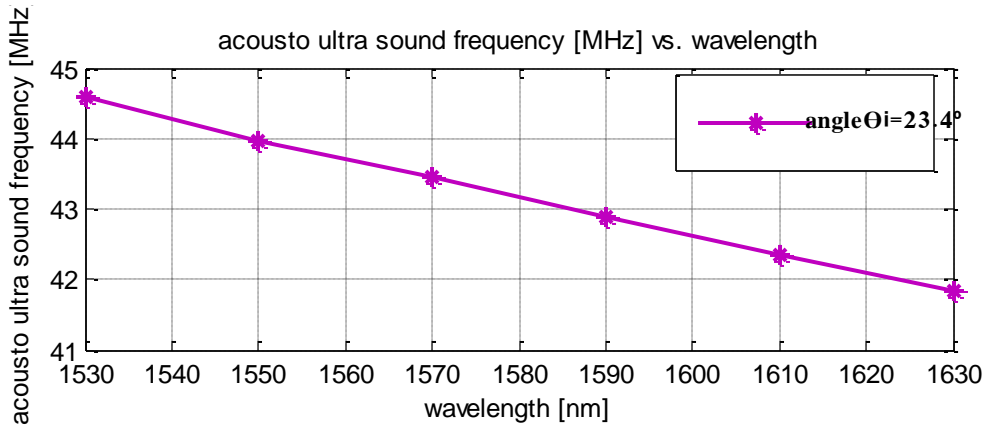
الجدول (3) قيم طول الموجة المنتخبة من قبل المرشح من أجل قيم مختلفة لتردد التداخل

fa[MHz]	$\lambda_0$ [nm]
44.6	1530
43.97	1550
43.45	1570
42.9	1590
42.35	1610
41.85	1630



الشكل (12) منحنيات فرق الطور والمردود (الاستجابة الطيفية) للمرشح من أجل تردد تداخل  $fa=44.6$  [MHz].

من الجدير بالذكر أن مردود التداخل أبدى استقراراً على القيمة الأعظمية من أجل كل الأطوال الموجية الواقعة ضمن الحزمة الموسعة (wide Band C: 1500nm–1650nm). في حين كانت قيمة الوريقات الجانبية أصغر. من الجدول (3) السابق يمكن رسم منحنى يمثل تردد التداخل كتابع لطول الموجة الصوتية المنتخبة فنحصل على الشكل (13)، حيث نلاحظ تابعة طول الموجة المنتخبة من قبل المرشح لتردد الموجة فوق صوتية المطبقة على محول الامواج فوق الصوتية، ووجود تناسب عكسي بينهما، أي إن تغيير قيمة التردد  $fa$  في المجال (41.85–44.6) MHz أتاح لنا توليف المرشح على كامل الاطوال الموجية الواقعة في مجال الحزمة (wide Band C).

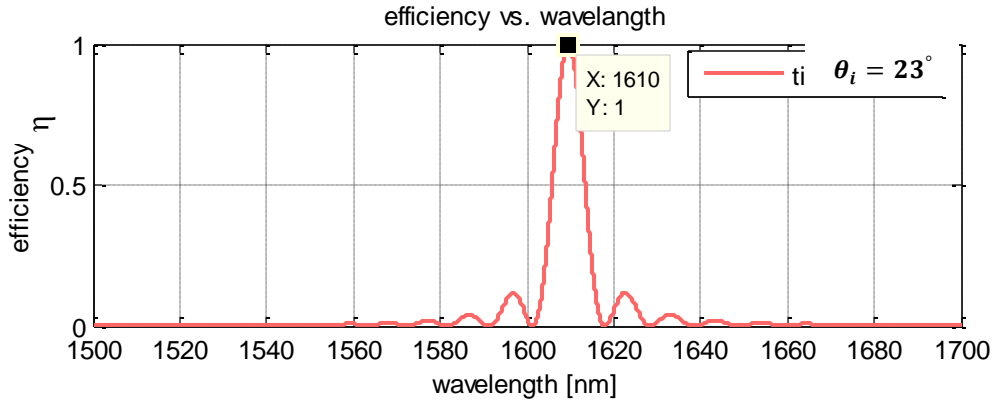


الشكل (13) يبين علاقة تردد التداخل كتابع لطول الموجة المنتخبة

### 2-5- دراسة تأثير زاوية ورود الشعاع الضوئي:

بتثبيت قيم جميع البارامترات وتغيير زاوية ورود الشعاع الضوئي بالنسبة للمحور الضوئي  $\theta_i$  يمكن التحكم بطول الموجة المنتخبة من قبل المرشح.

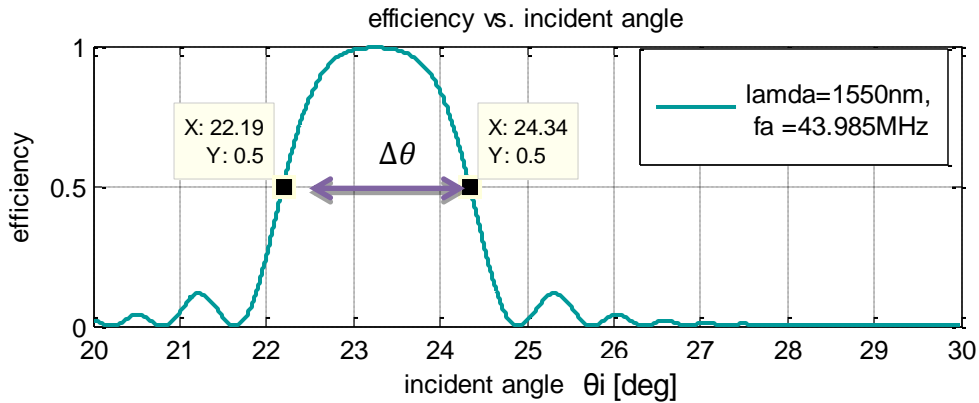
لنأخذ قيمة تردد التداخل  $f_a=43.97$ [MHz]، وعرض محول الأمواج فوق الصوتية  $W=L=1.5$ [cm]، وزاوية ورود الشعاع الضوئي  $\theta_i = 23^\circ$  نجد أن طول موجة الشعاع الضوئي المنتخبة  $\lambda=1610$ nm. أي إن تغيير الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس المتولد مع المحور الضوئي يؤثر على استخلاص المركبات الطيفية من الموجة الضوئية الواردة بالتفاعل فوق صوتي ضوئي.



الشكل (14) الاستجابة الطيفية للمرشح من أجل  $\theta_i = 23^\circ$

كما تمكنا برمجياً من استنتاج قيمة السماحية الزاوية للمرشح المصمم وحصلنا على المنحني التالي (الشكل (15)) الذي يتيح لنا تحديد قيمة الزاوية المسموح بها لتغيير زاوية ضبط الكريستال أمام الليف الضوئي والتي بلغت هنا

$$\Delta\theta = 2.15^\circ \text{ حول } \theta_i = 23.4^\circ \text{ من أجل } \lambda = 1550\text{nm}, f_a = 43.985\text{MHz}$$



الشكل (15) يبين قيمة السماحية الزاوية لوضعية الكريستال الخاص بالمرشح أمام الليف الضوئي

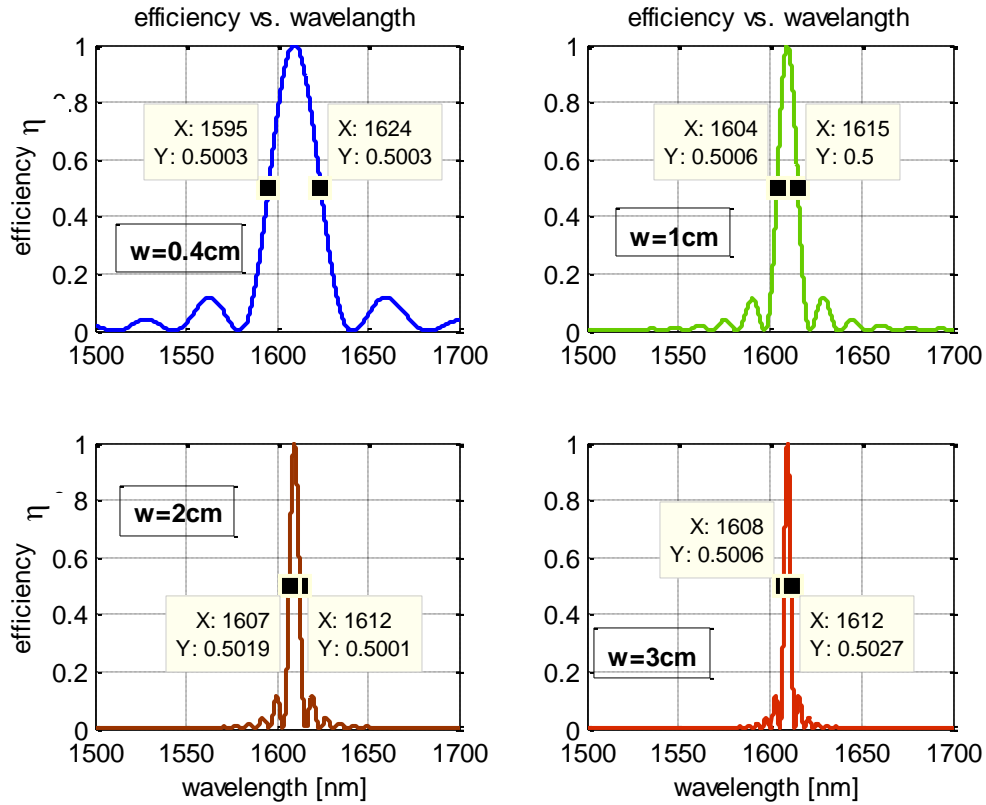
### 3-3- دراسة تأثير عرض محول الأمواج فوق الصوتية:

قمنا بأخذ عدة قيم لعرض محول الأمواج فوق صوتية وهي  $w=L=(0.4, 1, 2, 3)$  cm وإيجاد الاستجابة الطيفية الموافقة.

كما هو مبين بالشكل أدناه الشكل (16) أربع نوافذ تمثل الاستجابة الطيفية للمرشح المصمم من أجل قيم مختلفة  $w$  مع إبقاء باقي البارامترات ثابتة  $f_a=43.97\text{MHz}$ ،  $\theta_i=23^\circ$ ،  $\lambda=1610\text{nm}$ ، وقمنا بحساب قيمة الانتخابية الطيفية  $\Delta\lambda$  من أجل كل قيمة من الشكل (16)، كما هو موضح بالجدول التالي:

الجدول (4) الانتخابية الطيفية للمرشح عند تغيير أبعاد محول الأمواج فوق صوتية

$L=W$ [cm]	$\Delta\lambda$ [nm]
0.4	29
1	11
2	5
3	4



الشكل (16) الاستجابة الطيفية للمرشح من أجل قيم مختلفة لـ  $w$

نستنتج مما سبق وجود تناسب عكسي أيضاً بين عرض المحول والانتخابية الطيفية  $\Delta\lambda$ ، وإذا تم تغيير عرض محول الأمواج فوق الصوتية مع بقاء جميع المعطيات الأخرى ثابتة يمكن التحكم بالانتخابية الطيفية للمرشح. حيث إن زيادة عرض محول الأمواج فوق صوتية يضمن الحصول على عرض طيفي  $\Delta\lambda$  منخفض. تجري دراسات تؤكد أنه يمكن ضبط  $\Delta\lambda$  على القيمة المطلوبة بما يناسب تطبيقات (DWDM, UDWM) باستخدام تقنيات حديثة لتخفيض قيمة الوريقات الجانبية. [22]

**الاستنتاجات والتوصيات:**

- 1- تم من خلال البحث دراسة وتحليل نظرية التداخل فوق صوتي - ضوئي واستخدامها في تصميم المرشح الضوئي فوق الصوتي المؤلف AOTF.
- 2- إنشاء نموذج لمحاكاة عمل هذا المرشح باستخدام برنامج المحاكاة MATLAB، مع الأخذ بالاعتبار خصائص الكريستال المستخدم والموجة الضوئية وفوق الصوتية المستخدمة، حيث قمنا بتصميم صندوق خاص به يمكن إضافته إلى مكتبة الـ SIMULINK الخاصة ببرنامج MATLAB يمكن استخدامه في تطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة في الأنظمة الضوئية ويساعد الباحثين في هذا المجال في الحصول على دقة وسرعة في العمل.
- 3- تم اختبار ودراسة أداء هذا المرشح وتبين أن نموذج هذا المرشح يسمح بالتحكم بالانتخابية الطيفية وقيمة  $\Delta\lambda$  عن طريق التحكم بعرض محول الأمواج فوق الصوتية حيث يمكن تخفيض قيمة  $\Delta\lambda$  إلى القيمة المطلوبة بزيادة عرض هذا المحول لتناسب مختلف التطبيقات.
- 4- قمنا بدراسة تأثير تردد الموجة فوق الصوتية المطبقة على هذا المحول على طول الموجة المنتخبة.
- 5- يمكن أيضاً من خلال هذا النموذج دراسة تأثير بارامترات مختلفة على قيمة طول الموجة المنتخبة على خرجه.

**المراجع:**

- [1] GROBE, K. *Optical Wavelength Division Multiplexing for Data Communication Networks*. ADVA Optical Networking, Germany, 2009, 4.
- [2] KYEONG SOO, F.; KIM, T.; HSUEH, Y.; ROGGE, M., SHAW, W.; KAZOVSKY, L. *Evolution, Challenges and Enabling Technologies for Future WDM-Based Optical Access Networks*. Photonics and Networking Research Laboratory U.S.A. , 2009, 4.
- [3] SAIDUZZAMAN, Md.; IMTIAZ, AHMED.; KOWSHIK, M. *Crosstalk Analysis of an Acousto-Optic Tunable Filter Based Optical Add/Drop Multiplexer for DWDM System*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 4 (6), 2013, 1482-1486.
- [4] WARD, J.; PANNELL, C. N.; WACHMAN, E. S.; SEALE, W. *Applications of acousto-optic devices for spectral imaging systems*. NEOS Technologies, USA, 2006, 6.
- [5] NEEV. J. *New Studies of Acousto – Optic Interactions*. Arther Lakes Library Colorado School of Mines Golden, Colorado, 2010, 194.
- [6] YUANFENG, Z.; JISHENG, Y. *Optimization and Design of Acousto-Optic Tunable Filters*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, China, Vol. 7, No. 3, June 2005, p. 1599 -1604.
- [7] BUCHER, E.; CARNAHAN, J. *Characterization of an Acousto-optic Tunable Filter and Use in Visible Spectrophotometry*. Applied Spectroscopy, Vol. 53, Number 5, 2000, 9.
- [8] GAMALATH, W.K. *Diffraction of light by acoustic waves in liquids*. International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy Colombo 03, Sri Lanka, Vol. (4), 2012, 39-57.
- [9] ALWAN M.; AHMED, D. S. ; SALEMAN, U. N.; AHMED, I. S. *Effect of The Peak Phase Delay on an Acousto – Optic*. Journal of Al-Nahrain University Baghdad, Iraq, Vol.11 (3), 2008, 89-97.

- [10] CRESPO, A. *Error Measurements in an Acousto-optic Tunable Filter Fiber Bragg Grating Sensor System*. Wright Laboratory Puerto Rico, 2011, 103.
- [11] SANGTAEK, K.; MCLEOD, R.; SAFFMAN, M.; WAGNER, H. *Doppler-free, Multi-wavelength Acousto-optic deflector for two-photon addressing arrays of Rb atoms in a Quantum Information Processor*. Optoelectronic Computing Systems Center Colorado, 2013, 28.
- [12] TROPF, W.; THOMAS, M. E.; HARRIS, T. J. *Properties of Crystals and Glasses*. Chapter 33, Applied Physics Laboratory Laurel , Maryland, 1996, 100.
- [13] CHANG, I. C. *Acousto-Optic Devices and Applications*. Chapter 12, Aurora Associates Santa Clara , California, 20.
- [14] KUMAR, D.; PANDEY, SH. *Ultrasonics: A Technique of Material Characterization*. Source: Acoustic Waves, Book edited by: Don W. DISSANAYAKE, ISBN 978-953-307-111-4, pp. 466, SCIYO, Croatia, September 2010, 36.
- [15] SHENG, T. *Introduction to Ultrasonic Testing and Evaluation of Solid Media*. Department of Physics, 2010, 65-81.
- [16] جبره، رفيع. *الكريستال، هيئة الموسوعة العربية السورية*. دمشق، المجلد السادس عشر، 2012، - .235246
- [17] YOUSEF, S.; AL-SALAMI, A.; HOTZEL, M. *Optical and thermal characteristics of glasses based on TeO2*. Indian Academy of Sciences, Saudi Arabia, Vol. 35, No. 6, 2012, pp. 961–967.
- [18] This page was last modified on 25 May 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optics#cite\\_ref-filter\\_10-2](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optics#cite_ref-filter_10-2).
- [19] KIM, S.; GAO, L. WAGNER, K.; WEVERKA, R.; MCLEOD, R. *Acousto-optic tunable filter using phased-array transducer with linearized RF to optical frequency mapping*. Rainer Reibold Proc. of SPIE, USA, Vol. 59, 2012, 8.
- [20] VOLOSHINOV, V. B.; YUSHKOV, K. B. *Acousto-optic Interaction of Two Light Beams in a Paratellurite Crystal*. ISSN 1064-2269, Journal of Communications Technology and Electronics, Russian, Vol. 52, No. 6, 2007, 678–683
- [21] YARIV, Y. *The Electro optic and Acousto-optic Effects and Modulation of Light Beams*. Chapter 19, 2000, 17.
- [22] ISSA, H.; Quintard, V.; Pérennou, A.; Sakkour, A. *Double-pass in acousto-optic tunable filter for telecommunication network*. Optical Engineering, USA, Vol. 53 (7), 18 July 2014, 7.