

مرشح فوق صوتي-ضوئي مؤلف من أجل الجيل القادم لشبكات النفاذ الضوئية

الدكتور عفيف عزيز صقور*

(تاريخ الإيداع 28 / 1 / 2009. قُبل للنشر في 29/6/2009)

□ ملخص □

تعتبر شبكات النفاذ الضوئية التي تستخدم تكنولوجيا التجميع بتقسيم طول الموجة عالية الكثافة DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) حلاً واعدة من أجل الجيل القادم لشبكات النفاذ الضوئية التي يمكن أن تزود المستثمر بعدة Gbit/s و بالتالي هناك طلب متزايد على العناصر الضوئية التي تستخدم هذه التكنولوجيا. يقدم البحث دراسة تصميمية متكاملة لعنصر ضوئي (يعتمد في تصميمه على استخدام تكنولوجيا التداخل فوق صوتي-ضوئي) بغية استخدامه كمرشح أو فارز أطوال موجة مجمعة في شبكات النفاذ الضوئية التي تستخدم تكنولوجيا DWDM. يكمن الهدف الرئيسي للبحث من خلال العمل على تحقيق تأدية عالية الدقة في تصميم المرشح و التي تتمثل في القدرة على التحكم و إدارة (32 قناة) مجمعة ضمن ليف ضوئي أحادي النمط SMF (Single Mode Fiber) و بفاصل طيفي 0.8 nm. أنجزت الحسابات التصميمية ضمن النفاذ الضوئية 1530-1565nm حيث تكون الضياعات داخل الليف الضوئي أحادي النمط لا تتجاوز 0.2dB/km.

الكلمات المفتاحية: التجميع بتقسيم طول الموجة عالي الكثافة، شبكات النفاذ البصرية، التداخل فوق صوتي-ضوئي

* مدرس - قسم الاتصالات و الإلكترونيات - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Tunable Acousto-Optic Filter For New Generation of Optical Access Network

Dr. Afif Sakkour*

(Received 28 / 1 / 2009. Accepted 29 / 6 / 2009)

□ ABSTRACT □

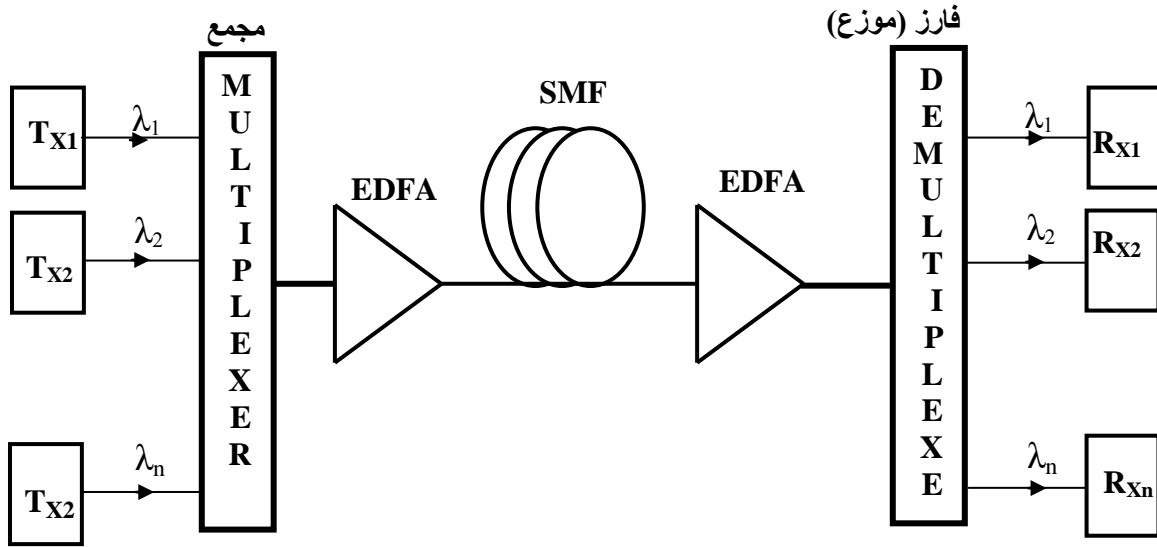
The Optical Access Networks that use combining Technology (Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)) are considered promising solutions for the net-generation of the optical access networks that can provide to the subscriber several Gbit/s; and consequently there is a growing demand for the optical components that use this technology. This research presents an integrated design study of optical elements (that depends in its design on the use of interaction acousto-optic technology) for the purpose of using it as a filter or separator of dense wavelength in optical access networks through DWDM technology. The main objective of the research is to reach a highly accurate performance in designing the Filter through the capability of control and management of 32 Channels combined in a Single Mode Fiber (SMF) with a spectral span of 0.8 nm. The Design calculations had been achieved into the optical window 1530-1565nm where the losses inside the Single Mode Fiber do not exceed 0.2 dB/Km.

Key Words: DWDM, Optical Access Network, Acousto-Optic Interaction.

*Assistant Professor, Department of communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

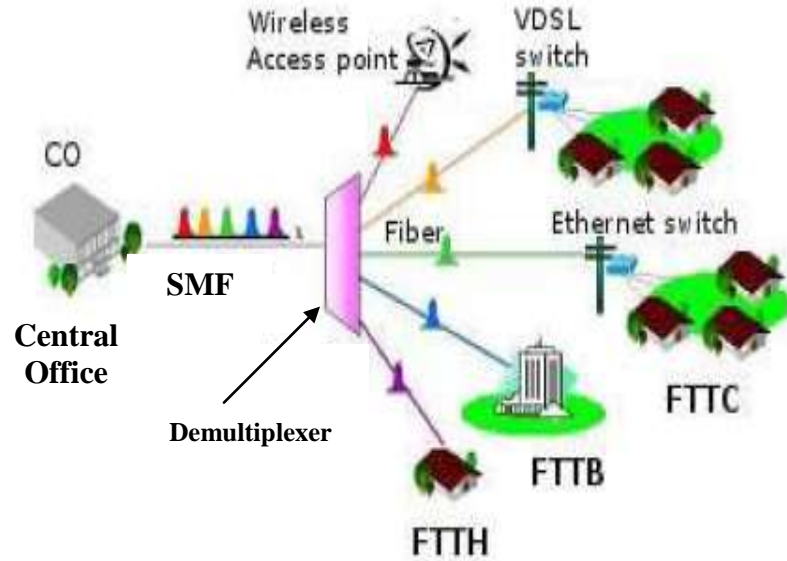
اعتمدت أنظمة الإرسال في الثمانينات على التجميع بتقسيم الزمن TDM فقط، وذلك باستخدام طول موجة ضوئية واحدة، ظهر جيل جديد للإرسال في بداية التسعينات باستخدام تكنولوجيا التجميع بتقسيم طول الموجة WDM. ولدت هذه التكنولوجيا عن طريق فكرة حقن عدة إشارات رقمية لها نفس سرعة التعديل داخل ليف ضوئي بنفس الوقت، و لكن كل إشارة تملك طول موجة محدد (مختلف عن الآخر)، يقوم جهاز الإرسال بتجميع (n) قناة و بتدفق وسطي (D)، بينما يقوم جهاز الاستقبال بفرز الإشارة الكلية ذات التدفق (n*D) إلى n إشارة (شكل 1). سمحت التطورات السريعة جداً في التسعينات في مجال أبحاث المضخات الضوئية بإنتاج مضخات ضوئية صرفة دون الحاجة إلى عملية تحويل الفوتونات إلى الكترونات ثم إعادتها من جديد إلى فوتونات، استخدم هذا النوع من المضخات في أنظمة التراسل لمسافات بعيدة جداً، حيث حلت بشكل كامل مكان المكررات الالكترونية (Repeaters). إن إحدى أهم مواصفات المضخات الضوئية المنشطة بعنصر الأربيوم النادر (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) أنها تعمل بشكل مستقل عن معدلات الإرسال للإشارة الضوئية، و كذلك قدرتها على تضخيم عدد كبير من أطوال الموجة بنفس الوقت مما يسمح بسهولة زيادة معدلات الإرسال لشبكات DWDM المنشورة مسبقاً [1].



شكل(1): مخطط لنظام تجميع التقسيم حسب طول الموجة WDM

نظم اتحاد الاتصالات الدولي المجال الضوئي لنظام الاتصالات الضوئية متعددة الألفية باستخدام المضخات الضوئية ضمن نافذة تراسل للمعطيات تقع بين 1530nm و 1565nm. كذلك نظم اتحاد الاتصالات التباعد المسموح بين قناة و أخرى بالنانومتر (nm) أو بالغيغاهرتز (GHz)، و استنادا إلى هذا التقسيم، تم تصنيف التجميع بتقسيم طول الموجة إلى عدة أنواع [1]:

- التجميع الخشن (CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexing) حيث تتباعد القنوات بمقدار 1.6nm أو 200GHz.
 - التجميع الكثيف (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) بتباعد 0.8nm أو 100GHz.
 - التجميع عالي الكثافة (U-DWDM: Ultra- Dense Wavelength Division Multiplexing) بتباعد 0.4nm أو 50GHz ويمكن أن يصل التباعد أيضاً إلى 0.2nm(25GHz).
يمكننا حسب الاعتبارات الاقتصادية، و كذلك نمط شبكات النفاذ المتوضعة مسبقاً، اختيار نمط للنفاذ من بين عدة إمكانيات متاحة (شكل(2)) وهي:
1. FTTH(Fiber To The Home) حيث يصل الليف الضوئي حتى منزل المشترك، أي أن الإشارة تبقى بصرية، مما يستدعي زيادة في الكلفة و الصيانة.
 2. FTTB(Fiber To The Building) حيث يصل الليف الضوئي حتى مدخل العمارة.
 3. FTTC(Fiber To The Curb) حيث يصل الليف الضوئي إلى الرصيف (من أجل تخديم عدة منازل).



شكل(2):أنواع شبكات النفاذ باستخدام تجميع التقسيم حسب طول الموجة WDM

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث بشكل أساسي إلى دراسة و تصميم و توصيف مرشح DWDM الذي يركز في تصميمه على استخدام تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي ، و يكمن الهدف الرئيسي للبحث من خلال العمل على تحقيق تأدية عالية الدقة في تصميم المرشح و التي تتمثل في القدرة على التحكم و إدارة (32) قناة مجمعة ضمن ليف بصري

أحادي النمط و بفاصل طيفي (100 GHz) 0.8 nm و بحيث يكون المرشح ملائماً للتراسل بواسطة الرزم البصرية، حيث يقترن طول الموجة بخدمة معينة، مثل تحميل معطيات (فيلم...الخ)، علماً بأن الدراسة تمت ضمن النافذة الضوئية 1530-1565nm حيث تكون الضياعات داخل الليف الضوئي أحادي النمط لاتتجاوز 0.2dB/km تتحصر أهمية البحث في مواصفات المرشح المصمم والتي يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

- (i) عدم الحاجة إلى تحويل بصري / كهربائي أو العكس في تصميم المرشح.
- (ii) القدرة على التحكم المستمر (برمجياً) باستطاعة الموجة الضوئية في خرج المرشح؛ أي تحقيق تابع مهم و هو تابع المساواة (Equalization Function) مما يسمح بالحصول على شدة ضوئية ثابتة على كامل الطيف الترددي المستخدم.
- (iii) ضياعات بصرية منخفضة.
- (iv) عدم الحاجة إلى إعادة تحريك و ضبط المرشح ميكانيكياً بعد تثبيته في المكان المحدد في شبكة الاتصالات البصرية عند تغيير طول الموجة الضوئية المطلوب انتقاؤها .
- (v) السرعة في إعادة معايرة المرشح (القدرة على الانتقال من نافذة بصرية إلى أخرى برمجياً).

طرائق البحث ومواده:

للوصول إلى الهدف المطلوب يجب دراسة ما يلي:

- الاختيار الأمثل للكريستال المستخدم كوسط للتداخل.
- اختيار اتجاه انتشار الموجة فوق الصوتية و سرعتها .
- تحديد نوع التداخل فوق صوتي - ضوئي.
- إنجاز الحسابات الرقمية من أجل الكريستال المستخدم .
- تحديد المواصفات الهندسية الكاملة للمرشح.

إن دراسة النقاط السابقة بدقة تقدم تصميماً هندسياً متكاملماً للعنصر البصري المقترح استخدامه كفارز لأطوال الموجة المجمعدة بتقنية DWDM، و الذي أطلقنا عليه تسمية مرشح فوق صوتي - ضوئي TAOF_{DWDM} للجيل القادم في شبكات النفاذ الضوئية.

تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي و تطبيقاتها:

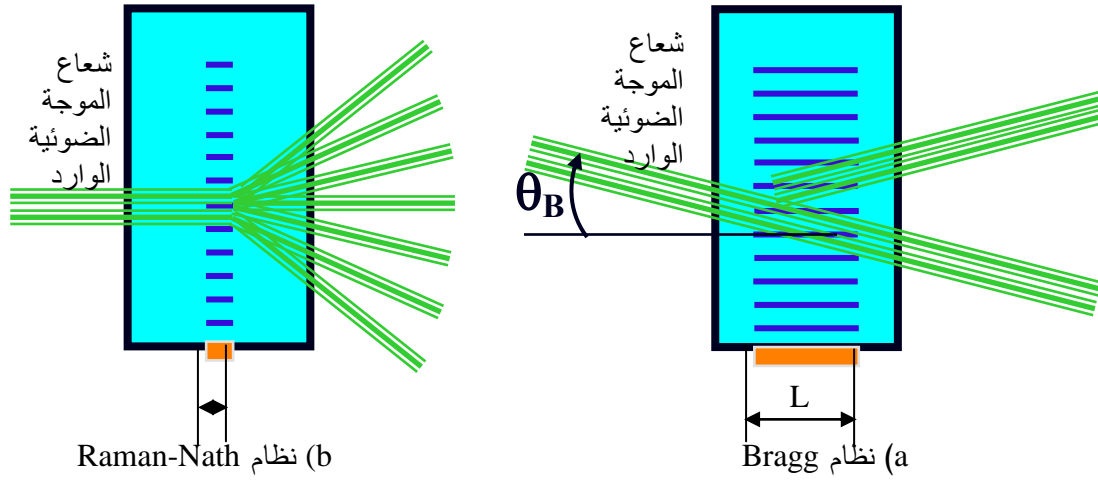
يرتكز التداخل فوق صوتي - ضوئي على التحكم بإشارة ضوئية عن طريق استخدام إشارة فوق صوتية ، بحيث تقوم هذه الأخيرة بتعديل دليل انكسار الوسط المستخدم للتداخل (كريستال). إن عملية تعديل دليل انكسار وسط التداخل تعرف تحت اسم فعل (Photo-Elastic) . تولد الموجة فوق الصوتية داخل الكريستال شبكة طوريه بعرض L و بخطوة تساوي طول الموجة فوق الصوتية Λ_a . إن مرور موجة ضوئية بطول موجي λ_0 في الفراغ الحر عبر الكريستال (ذي دليل انكسار n) المستخدم كوسط للتداخل ، يمكن أن تتحرف من قبل الشبكة الطورية المولدة بواسطة الموجة فوق الصوتية تحت عدة شروط.

يمكننا باستخدام تكنولوجيا التداخل فوق صوتي - ضوئي تنفيذ عدة عناصر ضوئية مثل (ماسحات ضوئية، معدلات خارجية ، مرشحات بصرية متوافقة للاتصالات الضوئية.....الخ) [2].

يوجد نمطان أساسيان للتداخل فوق صوتي - ضوئي: الأول، ويسمى نظام Raman-Nath و الثاني، نظام Bragg شكل (2b). يمكن التمييز بين النمطين باستخدام عامل Q يدعى بارامتر Klein-Cook و الذي يعطى بالعلاقة [3]:

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

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



شكل(3):نظام التداخل فوق صوتي-ضوئي

يعطى مردود التداخل في نظام براغ بالعلاقة :

$$\eta = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0} \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right)^2}}{\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{P}_0} + \left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right)^2} \quad (2)$$

حيث: I_1 : الشدة الضوئية للنمط المنعكس ، I_0 الشدة الضوئية للنمط المنتشر
 \mathbf{P} : استطاعة الموجة فوق الصوتية ، \mathbf{P}_0 استطاعة الموجة فوق الصوتية اللازمة لعكس 100% الشعاع الضوئي الوارد عند التزامن. $\Delta\phi$ فرق الطور الناتج عن تداخل غير متزامن بين الشعاع الضوئي الوارد وشعاع الموجة فوق الصوتية

تعتبر عملية التداخل فوق صوتي - ضوئي كعملية تصادم بين فوتون وفونون، إن انحراف الشعاع الضوئي تحت نظام براغ يتطلب تطبيق مصونية الطاقة، حيث أنه يمكننا تطبيق العلاقتين (3) و (4):

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

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

بينما $\vec{K}_i, \vec{K}_a, \vec{K}_d$ تمثل على التوالي أشعة أطوال الموجة للشعاع المنعكس و الموجة فوق الصوتية والوارد. بينما $\omega_i, \omega_a, \omega_d$ تمثل الترددات الزاوية للشعاع المنعكس و الموجة فوق الصوتية و الشعاع الوارد على التوالي.

الخطوات التصميمية للمرشح فوق صوتي - ضوئي المتوافق (TAOF):

1- اختيار وسط التداخل (الكريستال):

بشكل عام ، تطرح عملية تصميم عناصر للتداخل 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 و مجالات تمريرها لأطوال الموجة الضوئية [4].

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

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

يتميز الباراتولوريت (TeO₂) من بين كل الأنواع المبينة في الجدول (1) بمواصفات نوعية من الناحية البصرية، فوق الصوتية و فوق الصوتية -بصرية تجعله أكثر أنواع الكريستالات استخداماً و خصوصاً في تطبيقات الاتصالات و الالكترونيات.

يعتبر الباراتولوريت شفافاً جداً من الناحية البصرية ضمن نطاق عريض من أطوال الموجة الضوئية، حيث يمكن استخدامه ضمن النطاق المرئي (400-700nm) في تطبيقات الإسقاط الجسم للإشارة الفيديوية و كذلك إمكانية استخدامه ضمن نافذة الاتصالات (800-1560 nm) من أجل تطبيق التجميع بتقسيم طول الموجة.

2-اختيار اتجاه انتشار الموجة فوق الصوتية و سرعتها:

نشرت الثابت المرنة الممثلة بالتونسور C_{ij} للكريستال المستخدم في التصميم TeO₂ من قبل عدة باحثين [5]. درست عملية انتشار الموجة فوق الصوتية داخل هذا الكريستال غير متماثل المناحي Anisotrop من قبل Omahi ،الذي قام بحساب سرعات انتشار الأمواج فوق الصوتية ذات الاستقطاب العرضاني و الطولاني التي يمكن أن تنتشر داخل هذا الكريستال. برهن Omahi على وجود منحنى تباطؤ (مقلوب السرعة) للموجة فوق الصوتية العرضانية الاستقطاب في الاتجاه [110] و المستقطبة بالاتجاه [110] و التي تنتشر بسرعة تبلغ 616m/s و بتخامد مقداره 2.8 dB/cm عند التردد 100 MHz . كذلك برهن على وجود موجة فوق صوتية طولانية الاستقطاب هامة تنتشر وفق المحور البصري للكريستال بسرعة V_L=4200m/s.

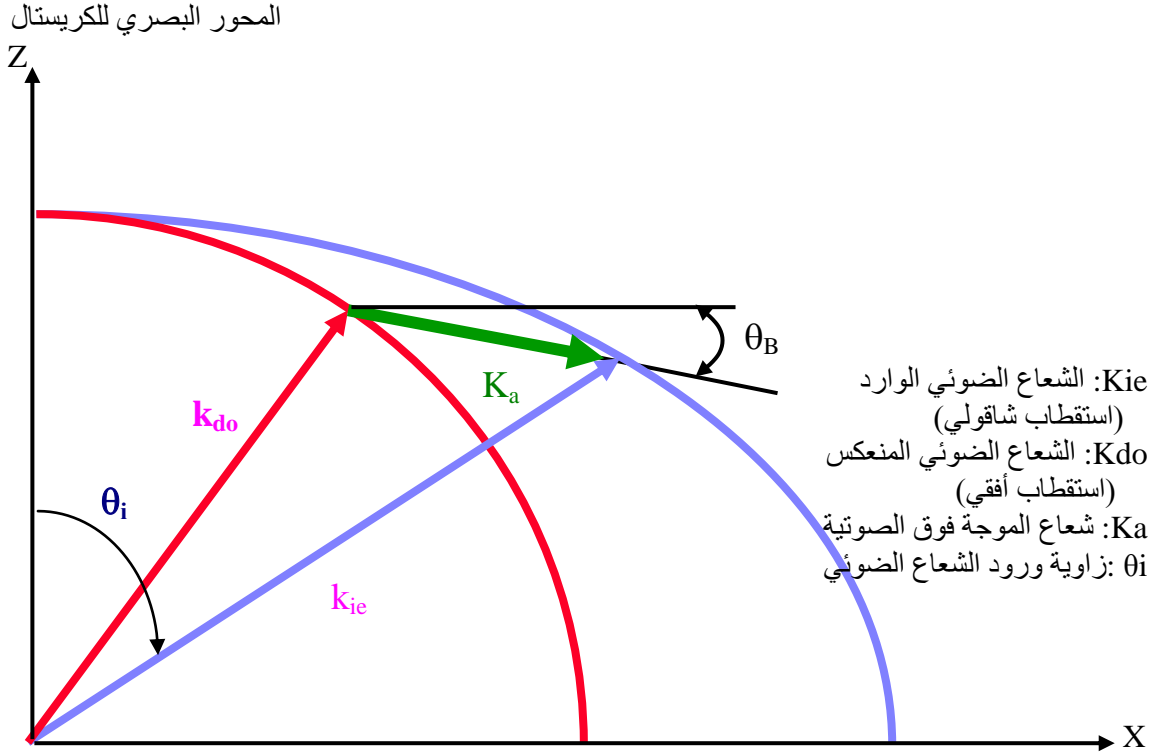
إن اختيار سرعة الموجة فوق الصوتية، و كذلك نوعية استقطابها يعتمد بشكل أساسي على نوعية التطبيق المطلوب تصميم عنصر التداخل من أجله، فمثلاً عند استخدام خلية التداخل كمبدلات بصرية

(Optical Commutator)، تستخدم الموجة فوق صوتية طولاً نية الاستقطاب، و التي تنتشر بسرعة كبيرة للحصول على زمن تبديل صغير جداً، أما في التطبيق الذي نريد تصميم خلية التداخل من أجله (أي فارز أطوال موجة مجمعة بتقنية DWDM ضمن ليف بصري أحادي النمط) فبجب استخدام الموجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب ذات السرعة المنخفضة لاعتبارات متعددة و هي أن مردود التداخل و بالتالي شدة الشعاع الضوئي في خرج الخلية يكون أعظماً عند سرعات منخفضة للموجة فوق الصوتية و أيضاً الاستقطاب العرضاني للموجة فوق الصوتية يعطي مرونة أعلى في التصميم.

3- تحديد نمط التداخل للمرشح فوق صوتي - ضوئي

يوجد ثلاثة أصناف للمرشحات فوق صوتية-ضوئية المتوافقة بمواصفات و مزايا مختلفة [6]. يعتمد الصنف الأول على التداخل فوق صوتي-ضوئي المتناظر في وسط كريستالي متماثل المناحي (متناظر)، يتعلق مردود التداخل في هذا النوع من المرشحات بشكل كبير بزواوية ورود الشعاع الضوئي، أي أن الفتحة الزاوية للمرشح ضعيفة جداً. يقتضي التعلق الحاد لمردود التداخل بزواوية ورود الشعاع الضوئي استخدام منابع ضوئية متماسكة كالمنابع الليزرية حصراً. يعتمد الصنف الثاني على التداخل فوق صوتي-ضوئي غير المتناظر في وسط غير متناظر (غير متماثل المناحي) حيث يكون دليلاً الانكسار للشعاع الضوئي الوارد و المنعكس مختلفين ، في هذا الصنف من المرشحات ينتشر الشعاع الضوئي و شعاع الموجة فوق الصوتية بشكل متوازي داخل الكريستال و يدعى هذا النوع من التداخل بالتداخل المتوازي، يؤثر تغير زاوية ورود الشعاع الضوئي بشكل ضعيف جداً على مسألة التزامن، وبالتالي يكون شرط التداخل المتزامن محققاً بشكل دائم. يمكن تنفيذ هذا النوع من التداخل باستخدام كريستال غير متناظر مثل الكوارتز (Quartz) أو $(CaMoO_4)$.

يستخدم الصنف الثالث نمطاً للتداخل يدعى بالتداخل فوق صوتي-ضوئي غير المتوازي في وسط كريستالي غير متناظر، يملك هذا النمط من التداخل مزايا متعددة و مرونة في التصميم. تم اختيار هذا النمط من التداخل في تصميم المرشح فوق صوتي-ضوئي $TAOF_{DWDM}$ بغية استخدامه في شبكات النفاذ التي تستخدم التجميع بتقسيم طول الموجة عالية الكثافة DWDM .



الشكل (4): المخطط الشعاعي للتداخل فوق صوتي - ضوئي

النتائج والمناقشة:

1- حسابات رقمية من أجل كريستال TeO_2

يصنف الكريستال المستخدم في تصميم المرشح $TAOF_{DWD}$ وسطاً غير متماثل المناحي ووحيد المحور موجب من الناحية البصرية ، تم اختيار هذا الكريستال من بين الأنواع المختلفة للكريستالات المتاحة بسبب وجود موجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب تنتشر بسرعة منخفضة قرب المحور [110] وهذا يعطي بدوره عامل استفاضة (Figure of Merit) مرتفعاً و بالتالي مردود تداخل عالي القيمة. يمكن حساب سرعة الموجة فوق الصوتية باستخدام تونوسر كريستوفل في المستوى (001) العمودي على المحور البصري [7] انطلاقاً من العلاقة التالية:

$$V_a = \sqrt{\frac{(C_{11} - C_{12}) + (2C_{44} - C_{11} + C_{12}) \sin^2 2\theta_B}{2\rho}} \quad (5)$$

حيث: C_{44}, C_{11}, C_{12} الثوابت المرنة للكريستال

θ_B الزاوية بالنسبة للمحور X ، ρ الكتلة الحجمية للكريستال

حصلنا على معادلتنا دليل الانكسار الموافقتين للموجة المستقطبة أفقياً وشاقولياً كتاباً لطول الموجة بواسطة

تابعي $polyvit$ و $polyval$ المتاحين في ماتلاب.

$$\begin{cases} n_0 = 16.78\lambda^6 - 87.8\lambda^5 + 186.5\lambda^4 - 207.4\lambda^3 + 128.5\lambda^2 - 42.6\lambda + 8.26 \\ n_e = 21.15\lambda^6 - 110.27\lambda^5 + 233\lambda^4 - 257.7\lambda^3 + 158.6\lambda^2 - 52.2\lambda + 9.7 \end{cases} \quad (6)$$

2- حساب ترددات التداخل

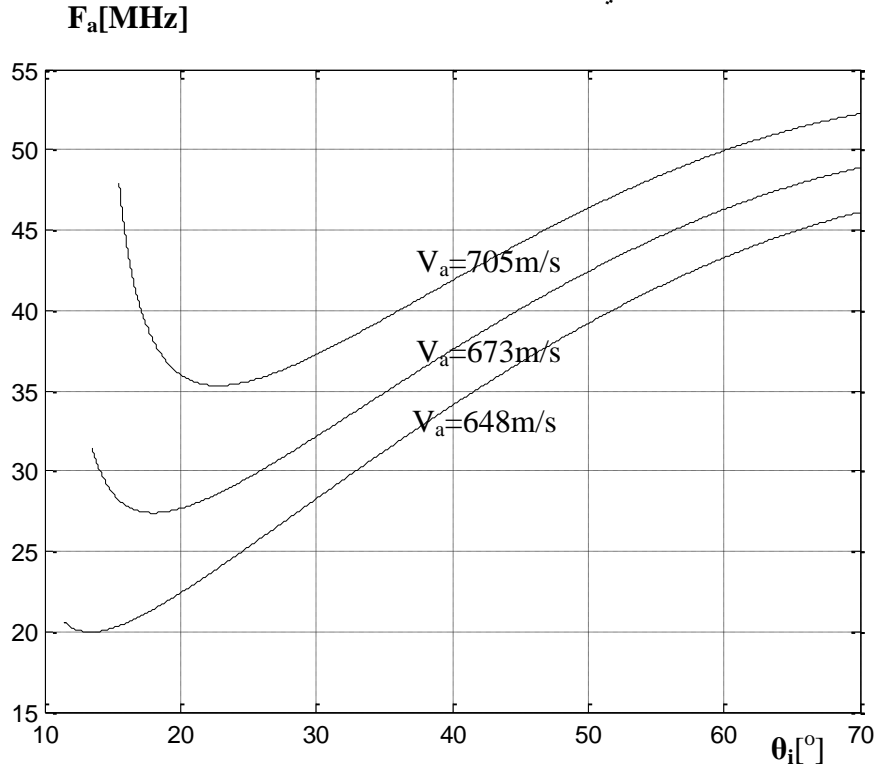
يمكن استنتاج تردد التداخل (F_a) انطلاقاً من المخطط الشعاعي للتداخل شكل (3) و تطبيق العلاقة (4):

$$F_a = \frac{V_a}{\lambda_o} \left[n_{ie} \sin(\theta_i - \theta_B) - \sqrt{n_o^2 - n_{ie}^2 \cos^2(\theta_i - \theta_B)} \right] \quad (7)$$

يبين الشكل (5) منحنى تردد التداخل كتابع لزاوية ورود الشعاع الضوئي مقاسةً بالنسبة للمحور البصري للكريستال من أجل سرعات مختلفة للموجة فوق الصوتية، أما الشكل (6) فيوضح منحنى التداخل من أجل ثلاثة أطوال موجة مختلفة ضمن نافذة الاتصالات [1530-1565nm].

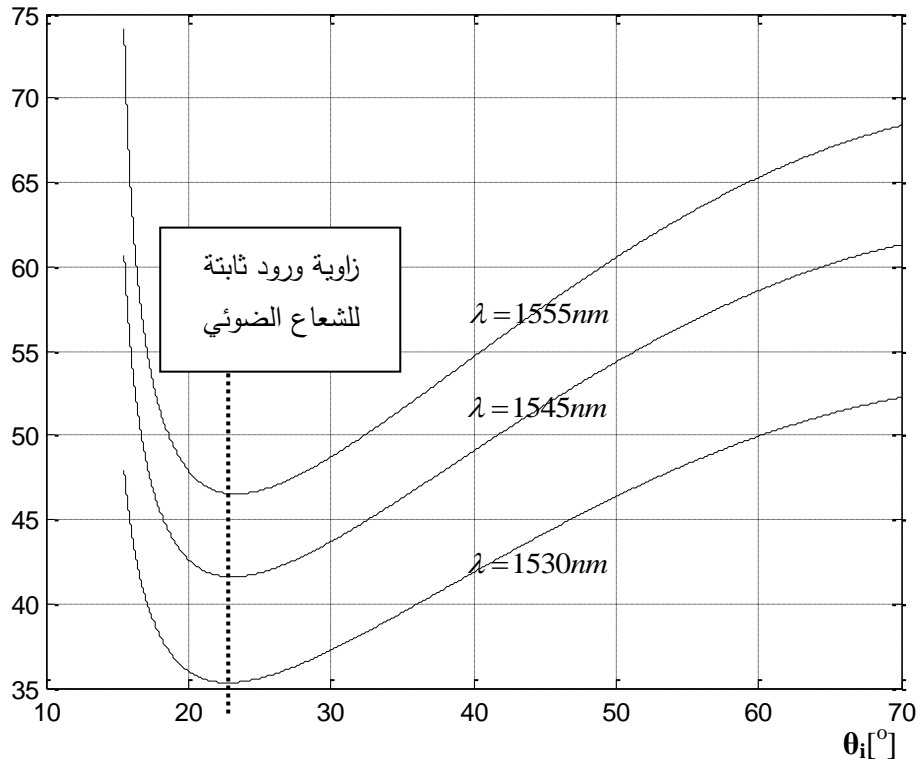
يعمل المرشح المصمم ضمن نطاق عريض من أطوال الموجة، حيث يبدي الكريستال المستخدم في تصميم ال TAOF_{DWDM} شفافية عالية ضمن النافذة البصرية 300-5 μ m. يتم تحديد النطاق البصري الحقيقي المستخدم من خلال عرض نطاق محول الأمواج فوق الصوتية المثبت على الكريستال.

تقتضي عملية تغطية النافذة الضوئية [1530-1565nm] استخدام محول أمواج فوق صوتية قادر على تأمين ترددات ضمن المجال [25-46MHz]. يبين الشكل (7) علاقة تردد التداخل كتابع لطول الموجة الضوئية على كامل النافذة البصرية المطلوب العمل عندها، أي من أجل 32 طول موجة.



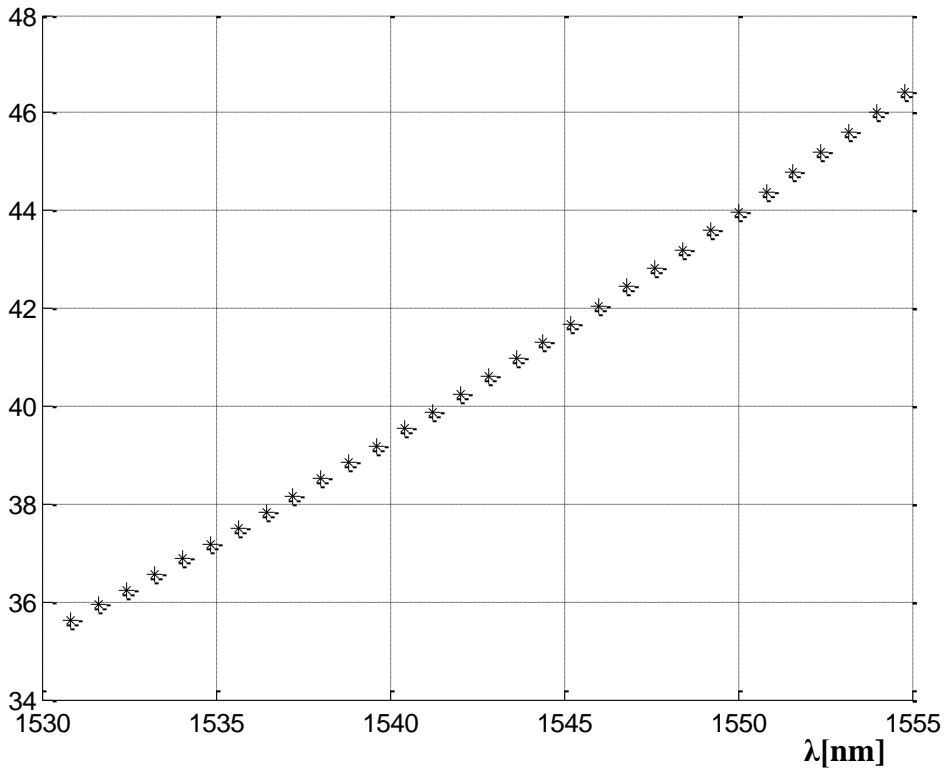
الشكل (5): تردد التداخل من أجل ثلاث سرعات مختلفة للموجة فوق الصوتية

F_a [MHz]



الشكل(6): تردد التداخل من أجل ثلاثة أطوال موجة مختلفة

F_a [MHz]



الشكل(7): تردد التداخل كتابع لطول الموجة الضوئية للمرشح TAOF_{DWDM}

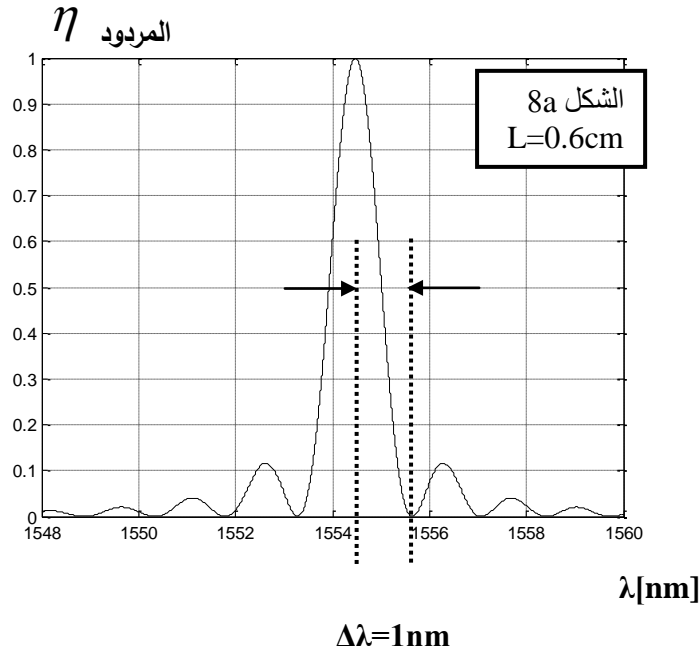
3-الانتخابية الطيفية للمرشح

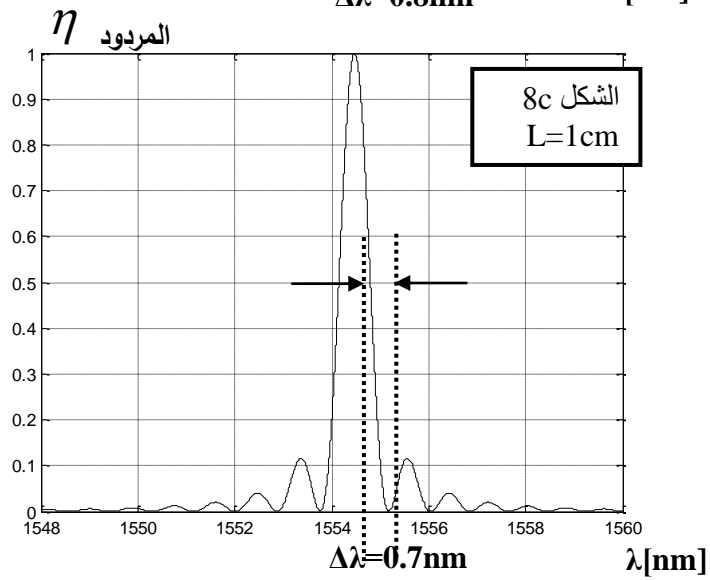
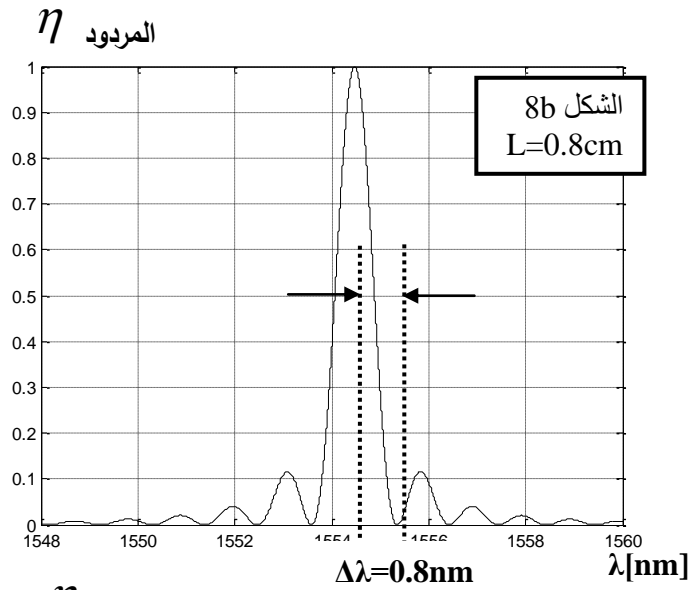
يمكننا تحديد الانتخابية الطيفية للمرشح المصمم انطلاقاً من طريقة عدم التزامن الطوري التي تعطى بالعلاقة:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_A}{L F_A \sin\theta_0} \frac{\Delta\varphi_{\max}}{\pi} \quad (8)$$

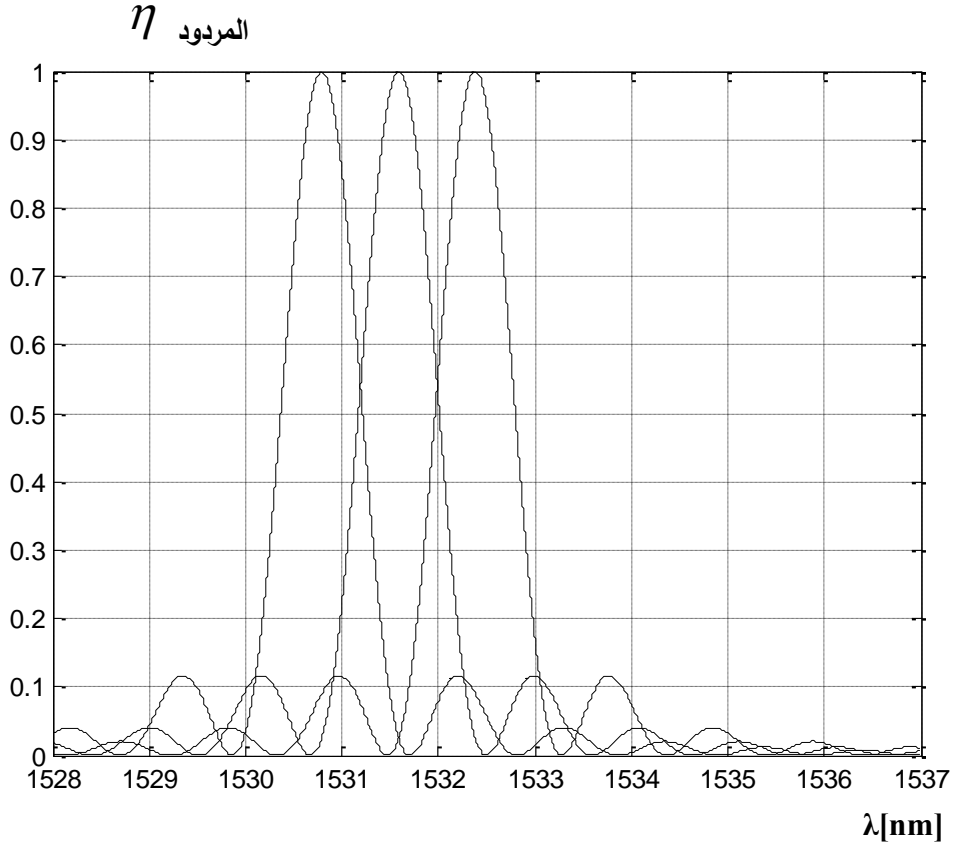
حيث: θ_0 : الزاوية بين شعاع الموجة فوق الصوتية و المماس عند سطح دليل انكسار الموجة الضوئية المنعكسة بعد التداخل فوق صوتي-ضوئي.
 $\Delta\varphi_{\max}$: القيمة العظمى لفرق الطور.

يمكننا أيضا إيجاد مقدار الانتخابية الطيفية من دراسة مردود التداخل كتابع لطول الموجة مع ثبات بقية البارامترات الداخلة في علاقة المردود. يبين الشكل (8) مقدار الانتخابية الطيفية من أجل قيم مختلفة لطول محول الأمواج فوق الصوتية L . تبلغ الانتخابية الطيفية للمرشح 0.8nm من أجل $L=0.8\text{cm}$ شكل (8b)، فيما يوضح الشكل (9) الانتخابية الطيفية لثلاث قنوات متجاورة، حيث يبدو أن القيمة العظمى لمردود قناة يقابله الصفر الأول لمردود القناة المجاورة، و هذا مهم جداً في عملية الفصل بين قناتين متجاورتين، وبالتالي عدم التداخل بينهما.





الشكل (8): الانتخائية الطيفية للمرشح $\text{TAOF}_{\text{DWDM}}$

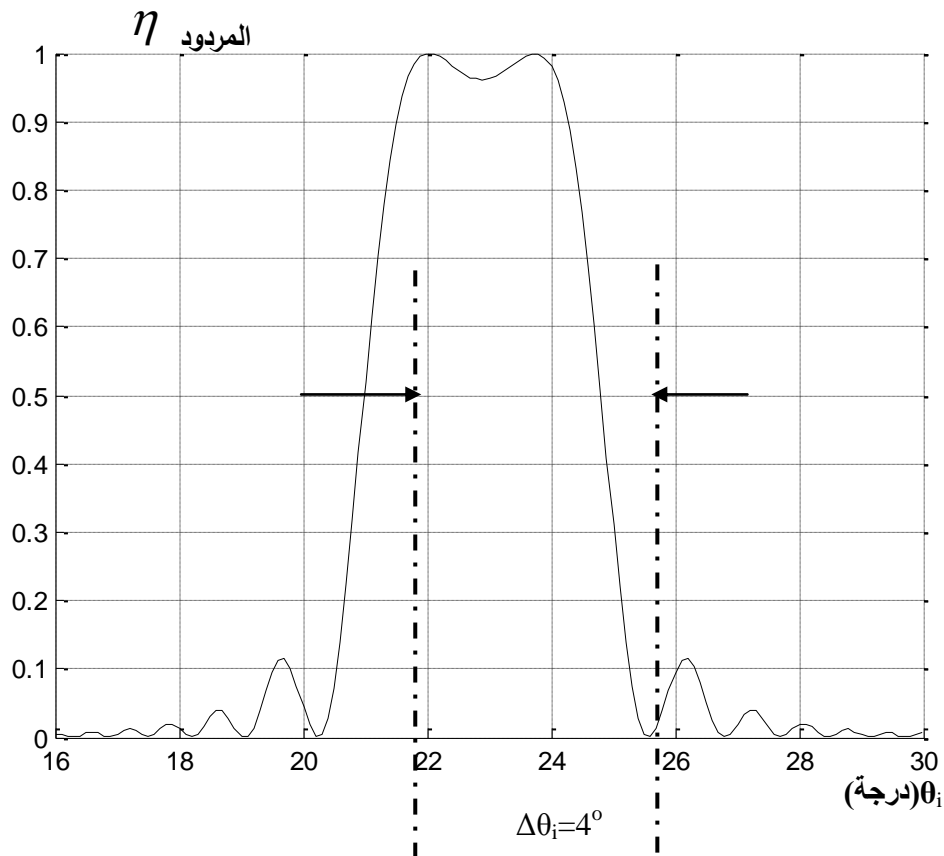


الشكل(9):مرود التداخل لثلاث قنوات متجاورة

4- السماحية الزاوية للمرشح

يقصد بالسماحية الزاوية للمرشح فوق صوتي-ضوئي بأنها مقدار التغير المسموح به لزاوية ورود الشعاع الضوئي الوارد مقاسه بالنسبة للمحور البصري للكريستال، بحيث لا يقل مرود التداخل عن 50% من القيمة العظمى له، و هي صغيرة نسبياً باعتبار أن التداخل فوق صوتي-ضوئي المتزامن (فرق طور يساوي الصفر) صعب التحقيق عملياً.

يمكننا زيادة القيمة العددية للسماحية الزاوية من خلال استخدام التداخل فوق صوتي-ضوئي غير المتناظر الذي يعطي مرونة عالية في تصميم المرشح. يمكن حساب السماحية الزاوية بدراسة مرود التداخل كتابع في زاوية ورود الشعاع الضوئي مع ثبات بقية البارامترات للمرشح. يبين الشكل(10) مقدار السماحية الزاوية عند 50% من المرود حيث.تبلغ $\Delta\theta_i = 4^\circ$ داخل الكريستال أي حوالي 8° في الفراغ الحر. كما و يمكننا أيضا زيادة هذه القيمة عند العمل عند تردد تداخل أعلى نسبياً من تردد التداخل المحسوب.

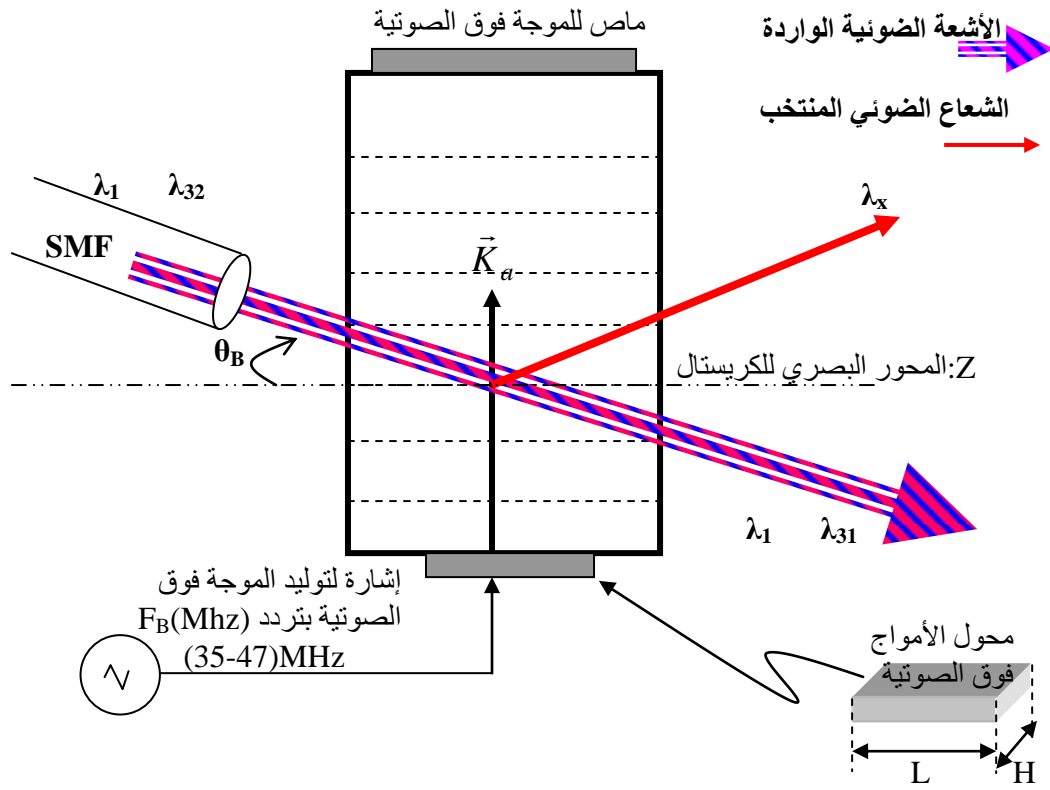


الشكل (10): السماحية الزاوية للمرشح $TAOF_{DWDM}$

5- مميزات و أبعاد المرشح $TAOF_{DWDM}$

يجب الأخذ بالاعتبار عند تصميم المرشح $TAOF_{DWDM}$ باستخدام كريستال TeO_2 المواصفات النوعية له التي تتعلق بشكل أساسي بكونه وسطاً غير متماثل المناحي بشكل حاد من الناحيتين البصرية و فوق الصوتية. ينتشر النمطان TE و TM داخل الكريستال باستقطاب خطي، عندما ينتشر الشعاع الضوئي بزوايا أكبر من 10° بالنسبة للمحور البصري للكريستال.

يتم توليد الموجة فوق الصوتية العرضانية الاستقطاب بواسطة محول أمواج فوق صوتية خاص (مقطع $X-41^\circ$ أو $Y-163^\circ$) [8]. يجب أيضاً تجنب انعكاسات الموجة فوق الصوتية المتعددة داخل الكريستال عن طريق زيادة البعد باتجاه انتشار الموجة الضوئية الواردة، يلخص الشكل (11) المميزات و الأبعاد الهندسية للمرشح بينما يبين الجدول (2) البارامترات الأساسية له.

الشكل(11): الشكل الهندسي للمرشح $TAOF_{DWDM}$ الجدول(2): البارامترات الأساسية للمرشح $TAOF_{DWDM}$

نوع الكريستال المستخدم	TeO_2
طول الموجة [nm]	1530-1554.8
دليل الانكسار للموجة المستقطبة افقياً	$\begin{cases} n_0 = 16.78\lambda^6 - 87.8\lambda^5 + 186.5\lambda^4 - \\ 207.4\lambda^3 + 128.5\lambda^2 - 42.6\lambda + 8.26 \end{cases}$
دليل الانكسار للموجة المستقطبة شاقولياً	$\begin{cases} n_e = 21.15\lambda^6 - 110.27\lambda^5 + 233\lambda^4 - \\ 257.7\lambda^3 + 158.6\lambda^2 - 52.2\lambda + 9.7 \end{cases}$
ترددات التداخل [MHz]	35.3-46.4
سرعة الموجة فوق الصوتية [m/s]	705
طول محول الأمواج فوق الصوتية [mm]	9
عرض محول الأمواج فوق الصوتية [mm]	1.1
الانتخابية الطيفية [nm]	0.8
السماحة الزاوية [درجة]	4

الاستنتاجات و التوصيات:

الاستنتاجات:

- أظهر البحث القدرة الانتخابية العالية لتكنولوجيا التداخل فوق صوتي- ضوئي عند استخدامها في تصميم المرشحات الضوئية، حيث لا يتطلب التصميم عملية تحويل كهربائي/ضوئي ثم ضوئي/كهربائي.
- من الشكل (8) نجد أن الانتخابية الطيفية تصل الى 0.8nm من أجل طول لمحول الأمواج فوق الصوتية لايتجاوز 0.8cm وهذا مايتناسب مع التجميع بتقسيم طول الموجة عالي الكثافة DWDM .
- المرونة في تثبيت الليف الضوئي أمام المرشح TAOFDWDM حيث أننا حصلنا على سماحية زاوية تبلغ 4 درجات تقريباً داخل الكريستال (أي 10 درجات خارج الكريستال)، كما هو مبين في الشكل (10) .
- العزل الجيد بين القنوات، حيث نجد من الشكل (9) أن القيمة العظمى لمردود قناة ما يقابله مردود صفري للقناة المجاورة.
- تم استنتاج علاقة عامة خاصة بالكريستال المستخدم لتبعية دليل الانكسار بدلالة طول الموجة المعادلة (6) و التي يمكن استخدامها عند إعادة برمجة المرشح للعمل عند أي نافذة اتصال ضمن الليف الضوئي أحادي النمط.
- يمكن استخدام ال TAOFDWDM إما بشكل تشاركي بين عدة مشتركين كما في حالة النفاذ FTTB أو تزويد كل مشترك بمرشح خاص به بغية انتخاب طول موجة محدد و الذي يمثل بدوره خدمة معينة كالقنوات التلفزيونية عالية الدقة مثلاً.

التوصيات:

- إعادة الحسابات التصميمية من أجل كريستال $CaMoO_4$ والذي يتمتع بمواصفات نوعية (جدول 2) تجعله مرشحاً أيضاً للاستخدام كفارز و كمبدل ضوئي في شبكات النفاذ الضوئية ثم مقارنة النتائج .
- تعديل المرشح المصمم TAOFDWDM ليتلاءم مع تكنولوجيا التجميع بتقسيم الاستقطاب (PDM:Polarization Division Multiplexing) المقترح استخدامها بشكل كبير في أنظمة الاتصالات الضوئية و التي تسمح بتقليل الكلفة و زيادة الفعالية الطيفية في أنظمة الاتصالات الضوئية. في هذه الحالة يتم إرسال إشارتين مختلفتين على طول موجة واحدة بنفس الوقت باستخدام خاصية استقطاب الضوء [9]، أي يمكننا مضاعفة عدد القنوات في الليف الضوئي لتصل إلى 64 قناة و هذا ما يمكن دراسته في بحث مستقل.

المراجع:

1. LECOY,P.I. *Télécom Sur Fibres Optiq.*3rd.ed.,Lavoisier,France,2008,366.
2. LAUDE, J.P. *Wavelength Division Multiplexing.*Prentice Hall International Series in Optoelectronics,1992.
3. KLEIN, W.R.; COOK, B.D. *Unified Approach to Ultrasonic Light Diffraction*,IEEE Trans.Sonics Ultrason, 14, 3,1967,24-134.
4. www.ISOMET.com.
5. UCHID,N.; OHMACHI, Y.:. *Elastic and Photoelastic Properties of TeO₂ Single Crystal*, J. Appl.Phys, 40, 12,1969,4692-469.
6. CHANG,I.C. *Acoustooptic Devices and Applications*,IEEE Trans.Sonics Ultrason, 23, 1,1976,2-22.
7. OHMACHI,Y.; UCHID,N.; NIIZEKI,N. *Acoustic Wave Propagation in TeO₂ Single Crystal*, J. Acoustic. Soc. Am, 51, 1,1971,164-168.
8. DIEULESAINT,D.A.; ROYER,D.A. *Ondes élastiques dans les solides(Tome2)*. 2nd.ed MASSON France,1999,410.
- 9 HAN,Y.; LI,G. *Coherent Optical Communication Using Multiple-Input-Output*. Optics Express, 13, 19,2005,7527-7534.