

## تأثير زاوية انحراف الموجة فوق الصوتية على نمط التداخل وعامل الجودة للمرشحات فوق الصوتية - الضوئية المولفة

فرح جنينه\*

(تاريخ الإيداع 28 / 4 / 2016. قُبل للنشر في 20 / 11 / 2016)

### □ ملخص □

تعدّ المرشحات فوق الصوتية-الضوئية المعتمدة على تقنية التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية مرشحات عالية الأداء، حيث أنّها تملك مجال انتخابي هو الأكبر مقارنة مع الأنواع الأخرى من المرشحات وهذا ما يتيح استخدامها في شبكات التجميع بتقسيم طول الموجة (WDM: Wavelength Division Multiplexing) البصرية، ويهدف البحث إلى دراسة نموذجين لهذه المرشحات أحدهما يعمل وفق نمط التداخل غير المتوازي والآخر يعمل وفق نمط التداخل شبه المتوازي وذلك بهدف المقارنة بينهما من الناحية العملية . يهدف البحث إلى إظهار تأثير زاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية على تصميم المرشح وفعاليتيه في انتخاب طول الموجة الضوئية المرغوب بالإضافة إلى مقارنة منحنيات التردد الموافقة لهذه الزوايا من حيث حساسيتها لتغيرات زاوية الورود، كما تكمن أهمية البحث في إثبات فعالية المرشحات التي تعمل وفق النمط شبه المتوازي للتداخل وقدرتها على تحقيق القيم العالية جداً لعامل الجودة.

**الكلمات المفتاحية:** التجميع بتقسيم طول الموجة، مرشح فوق صوتي- ضوئي، مبدل الأمواج فوق الصوتية، زاوية الانحراف، التداخل غير المتوازي و شبه المتوازي.

\* ماجستير ، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة تشرين ، اللاذقية، سورية.

## The acoustic wave tilt angle effect on the interaction type and quality factor of the tunable acousto-optic filters

Farah Jnaikheh\*

(Received 28 / 4 / 2016. Accepted 20 / 11 / 2016)

### □ ABSTRACT □

The acousto-optic filters that depend on the interaction technology between the optical and ultrasonic waves are considered a high-performance filters as they have the largest tuning range compared to other filters types. These filters can be used in optical WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks.

This work aims to study two types of these filters, one operates according to the non-collinear type of interaction, whereas the other type operates according to the quasi-collinear type of interaction, and compare between these two filters types from the practical side. Thus, this work aims to show the tilt angle effect of the acoustic wave on the filter's design and its efficiency in electing the desired optical wave length, in addition to compare the frequency curves related to these angles in terms of their sensitivity to the changes of the incidence angle.

The importance of this work lies in proving the efficiency of the filters operating according to the quasi-collinear type of interaction and their ability to achieve the high values of quality factor.

**Keywords:** Wavelength Division Multiplexing, Acousto - Optic Filter, transducer, tilt angle, non-collinear and quasi-collinear interaction.

---

\* Master , Department of Communication & Electronics, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering , Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

إنّ مفهوم تقنية التّجميع بنقسيه طول الموجة ( WDM ) المستخدمة في الاتصالات البعيدة تطور ليزيد سعة المعلومات للمرشّح الضوئي الواحد، وتتألف إشارة الدخل في أنظمة WDM من العديد من الحوامل الطيفية الليزرية المنفصلة أو القنوات الطيفية المقسّمة إلى فترات طيفية متساوية.

وإن المرشّحات فوق الصّوتية-الصّوتية المولّفة الكترونياً هي أجهزة للتّحكم المتزامن والمستقل بالقنوات الطيفية في شبكات WDM وتعدّ هذه المرشّحات أجهزة ضوئية- الكترونية عالية الأداء تتمتع بخسارات دخل ضعيفة وتصميم طيفي عالي وطاقة قيادة منخفضة بالإضافة إلى فصل جيّد بين القنوات، وتعمل على مبدأ انحراف الضوء بواسطة الأمواج فوق الصّوتية ضمن بلورة عالية الشفافية، كما تستخدم تقنية التداخل بين الأمواج الصّوتية وفوق الصّوتية هذه في مجال المسح الضوئي والتّعديل الضوئي الخارجي وتصميم المبدّلات الضوئية عالية السرعة. بالإضافة إلى أنّ هذه الأجهزة تعمل بنجاح لحل مشاكل معالجة المعطيات البصريّة، وتكمن أهميّة هذه المرشّحات في أنّها تملك مجال انتخابي (Tuning Range) هو الأكبر مقارنة مع الأنواع الأخرى من المرشّحات، كما يمكن أن تستخدم في تطبيقات إضافة/حذف طول موجة ضوئية في عقد شبكات الاتصالات الصّوتية وكمسوّي إشارة [1,2,3].

وتعدّ مادة الباراتولوريت (ثاني أكسيد التيلوريوم  $TeO_2$ ) من أكثر المواد المستخدمة للتّرشح فوق الصّوتي-

الضوئي حيث أنّها تتمتع بالخصائص التّالية عند استخدامها في تصميم هذه المرشّحات[4]:

- نقل ضوئي عالي عبر مجال من أطوال الموجة الصّوتية.
- تخميد منخفض للموجة فوق الصّوتية.
- وجود انحراف ضوئي متباين في البلورة.
- قيمة عالية للعامل  $M_2$  (عامل الاستفادة لوسط التداخل) وهو بدوره يستخدم للمقارنة بين أنواع البلورات التي يمكن استخدامها بمثابة وسط تداخل.
- متطلبات طاقة قيادة RF (Radio Frequency) منخفضة.
- تشتت ضوئي منخفض.
- خصائص فيزيائية جيّدة لتحقيق الاستخدام الجيّد للمرشّح بالإضافة إلى إمكانيّة الربط الجيّد مع مبدّل الأمواج فوق الصّوتية.

وتقارن بارامترات الطّاقة العالية جداً لأجهزة الانحراف المستخدمة لبلورة  $TeO_2$  بشكل مباشر مع غالبية المواد الأخرى من خلال كفاءة الانحراف العالية لبلورة  $TeO_2$ ، كما أنّ استخدام الانحراف مع دوران اتجاه الاستقطاب للضوء المنحرف المرتبط بزواوية ورود يعطي إمكانيات إضافيّة لتطوير بارامترات الأجهزة والأدوات فوق الصّوتية- الصّوتية (AO:Acousto-Optic).

**أهميّة البحث وأهدافه:**

تعدّ المرشّحات فوق الصّوتية - الصّوتية من التقنيّات الحديثة المستخدمة في مجال الاتصالات الضوئية وفي شبكات WDM، وبالتالي يهدف البحث إلى تحديد نمط التداخل الذي تعمل وفقه هذه المرشّحات ويسمح بدوره بتحقيق انتخابية طيفية عالية وقيم مرتفعة جداً لعامل الجودة. كما تكمن أهميّة البحث في توضيح أثر زاوية الانحراف للموجة فوق الصّوتية على تصميم المرشّح وقيم التردد الواجب تطبيقها على مبدّل الأمواج فوق الصّوتية، من ثمّ على طول

الموجة الضوئية المراد انتخابها وقدرة المرشح على تحقيق الانتخابية العالية، ويدرس البحث نموذجين للمرشحات فوق الصوتية-الضوئية أحدهما يعمل وفق نمط التداخل غير المتوازي والآخر يعمل وفق نمط التداخل شبه المتوازي وحساب عامل الجودة لكل نمط ومقارنة النتائج مع بعضها وتوضيح أي النمطين يحقق الانتخابية الطيفية الأعلى، كما يهدف البحث إلى دراسة قيم متباينة لزاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية وبالتالي توضيح مدى تأثير هذه الزاوية على قيم التردد، ومقارنة حساسية منحنيات التردد (الموافقة لزاويا الانحراف هذه) لتغيرات زاوية الورد. كما يهدف البحث إلى إظهار تأثير كل من زاوية الانحراف والفتحة الزاوية معاً على المرشح فوق الصوتي (النمط غير المتوازي) ومقارنة قيم عامل الجودة في هذه الحالات.

### طرائق البحث ومواده:

للوصول إلى الهدف المطلوب يجب دراسة مايلي:

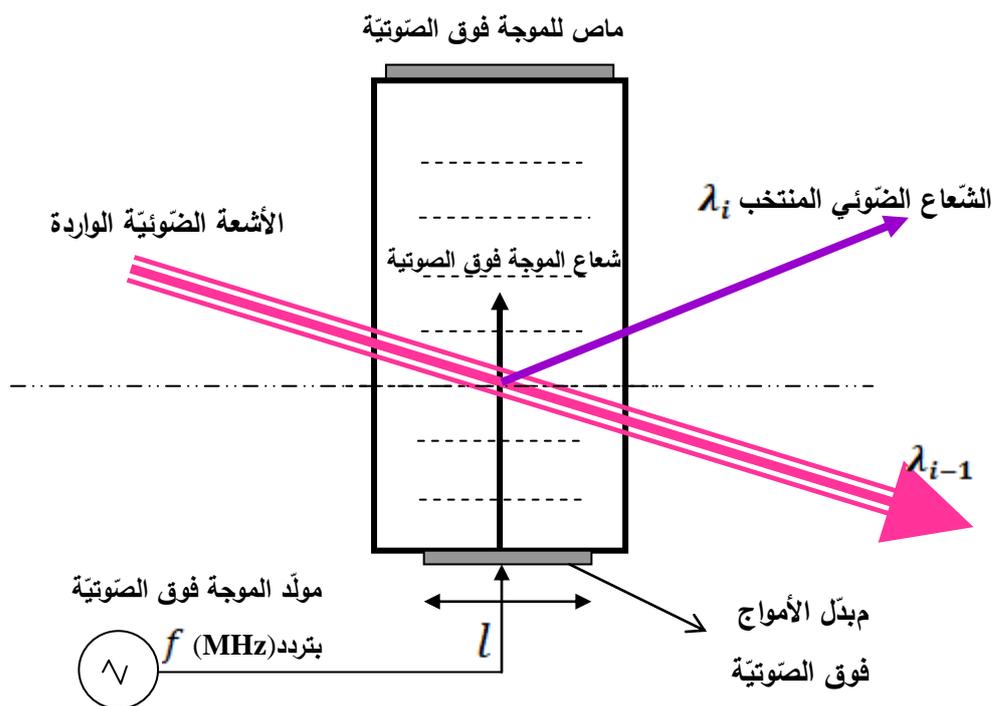
- اختيار بلورة الباراتولوريت  $TeO_2$  كوسط للتداخل وتوضيح خصائصها الضوئية وفوق الصوتية.
- تحديد زاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية (مقاسة بالنسبة للمحور OX العمودي على المحور البصري للبلورة) وحساب سرعة الموجة فوق الصوتية من أجل كل زاوية انحراف.
- الوصول من خلال المخطط الشعاعي إلى علاقات تردد الموجة فوق الصوتية.
- إجراء الحسابات الرقمية لهذا المرشح من أجل بلورة  $TeO_2$  المستخدمة، ومناقشة النتائج بالإضافة إلى مقارنة المنحنيات الناتجة.

• تحديد مواصفات المرشح الذي يحقق الانتخابية الطيفية العالية ويملك قيم مرتفعة لعامل الجودة.

وتم استخدام لغة الـ MATLAB لإظهار النتائج المتعلقة بهذه الدراسة من نتائج رياضية ومنحنيات بيانية.

### 1- تقنية التداخل فوق الصوتي - الضوئي:

تعتمد تقنية التداخل فوق الصوتي- الضوئي على استخدام بلورة عالية الشفافية ضمن النوافذ الضوئية الأساسية بحيث تمرر الأشعة الضوئية بأقل تخامد ممكن ودون أي انعكاس، ويتم لصق مبدل الأمواج فوق الصوتية على وجه واحد للبلورة بحيث عندما تطبق إشارة القيادة الكهربائية على المبدل يتم توليد موجة فوق صوتية راحلة ضمن البلورة وهذا بدوره ينتج تغير دوري في أدلة الانكسار للبلورة وبالتالي مناطق الضغط والخلخلة يكون لها التأثير نفسه على الشقوق في شبكة الانحراف المصممة للنقل، ويكون تردد الموجة فوق الصوتية هذه متعلق بطول موجة الشعاع الضوئي المراد انتخابه وبالتالي يتم انتخاب طول موجة واحد من بين  $N$  طول موجة في الليف الضوئي بينما تمرر بقية الأشعة الضوئية كما هو مبين في الشكل (1) [4,5,6].



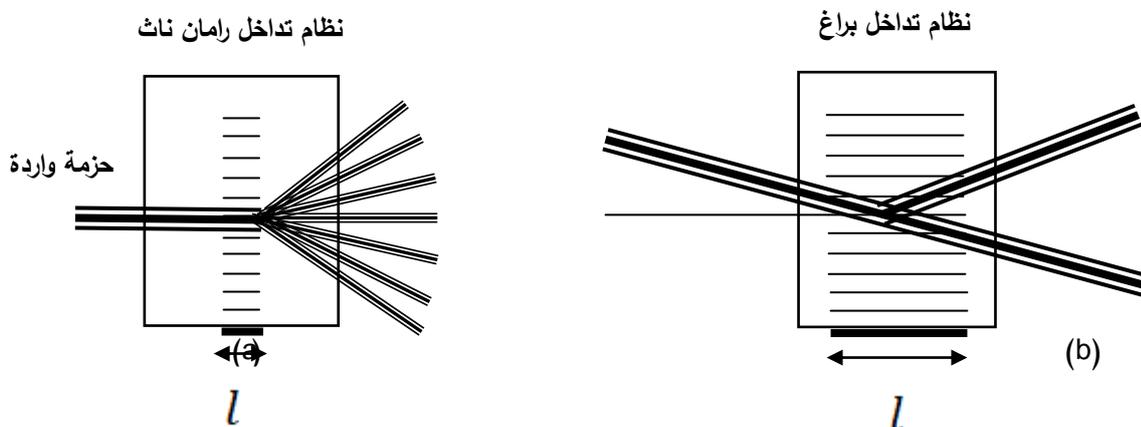
الشكل (1): المرشح فوق الصوتي - الصوتي المؤلف (AOTF).

من أجل كل شبكة انحراف رفيعة يتم حرف الشعاع الصوتي الوارد إلى عدة أشعة بتباعد زاوي متماثل إذا كان طول مبدل الأمواج فوق الصوتية (طول منطقة التداخل)  $l$  صغير وهذا يدعى تداخل رامان-ناث. أما إذا كان طول مبدل الأمواج فوق الصوتية أكبر نحصل على تداخل نوع براغ وفيه تنحرف كامل طاقة الموجة الصوتية الواردة في اتجاه محدد وهذا موضح في الشكل (2) و يحدد بالعلاقة التالية [7]:

$$Q = 4\pi \frac{l}{l_0} \quad (1)$$

حيث  $l$  : طول مبدل الأمواج فوق الصوتية المستخدم (طول منطقة التداخل).

$l_0$  : الحد الأدنى لطول مبدل الأمواج فوق الصوتية حتى يكون التداخل من النمط Bragg.



الشكل (2): (a) نظام تداخل رامان - ناث، (b) نظام تداخل براغ.

## 2- الخصائص الضوئية وفوق الصوتية لثاني أكسيد التيلوريوم $\text{TeO}_2$ [8]:

### 2-1- الخصائص الضوئية:

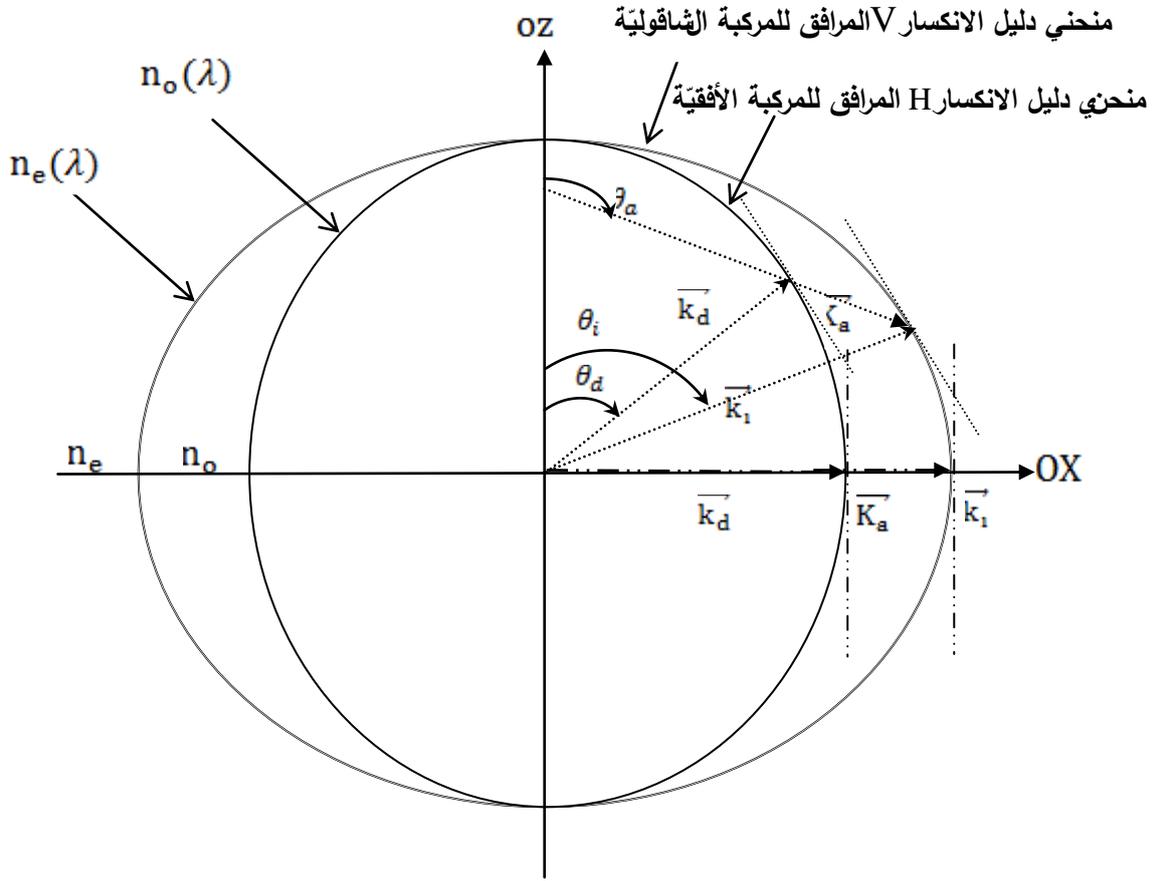
تتميز بلورة  $\text{TeO}_2$  بأنها شفافة جداً ضمن طيف واسع من أطوال الموجة الضوئية  $(300-500)\text{nm}$  [9,10] وهي بلورة غير متماثلة المناحي وأحادية المحور البصري وتملك دليل انكسار:

• دليل انكسار يسمى بدليل الانكسار العادي (ordinary index) وهو مستقل عن اتجاه انتشار الموجة الضوئية داخل البلورة ويرافق الموجة المستقطبة أفقياً.

• دليل انكسار يسمى بدليل الانكسار فوق العادي (extraordinary index) ويتعلق باتجاه انتشار الموجة الضوئية داخل البلورة ويرافق الموجة المستقطبة شاقولياً.

يبين الشكل (3) منحنيات أدلة الانكسار لبلورة أحادية المحور البصري بالإضافة إلى المخطط الشعاعي لمرشح

.AOTF



الشكل (3): منحنيات أدلة الانكسار للبلورة  $\text{TeO}_2$ .

حيث  $\theta_i$ : زاوية الورد للشعاع الضوئي.

$\theta_a$ : هي الزاوية التي يصنعها شعاع الموجة فوق الصوتية مع المحور البصري للبلورة OZ.

$\vec{k}_i$ : الشعاع الضوئي الوارد،  $\vec{K}_a$ : شعاع الموجة فوق الصوتية،  $\vec{k}_d$ : الشعاع الضوئي المنحرف.

ونشرت القيم العددية لدليل الانكسار  $n_o(\lambda)$  و  $n_e(\lambda)$  لبلورة  $\text{TeO}_2$  عند أطوال موجة ضوئية محددة من قبل

Uchida [9] كما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول (1): القيم العددية لدليلي الانكسار للبلورة  $\text{TeO}_2$ .

$\lambda_0(\mu\text{m})$	$n_o$	$n_e$
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

إذاً من أجل حساب قيم دليلي الانكسار عند أطوال للموجة الضوئية غير متوفرة في الجدول قمنا بوضع برنامج

ماتلاب واستخدام تابعي polyfit و polyval المتاحين في ماتلاب ووجدنا:

$$n_o(\lambda) = 0.0535\lambda^2 - 0.1872\lambda + 2.3418 \quad (2)$$

$$n_e(\lambda) = 0.0658\lambda^2 - 0.2259\lambda + 2.5121$$

## 2-2- الخصائص فوق الصوتية:

تصنّف المواد بشكل عام باستخدام مصفوفة الثوابت المرنة للمادة  $(C_{ij}(N/m^2))$ ، ونشرت القيم الرقمية للثوابت

المرنة للبلورة  $\text{TeO}_2$  من قبل عدة باحثين [11] وتعطى هذه القيم بالجدول التالي:

الجدول (2): قيم الثوابت المرنة للبلورة  $\text{TeO}_2$ .

$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$
5.57	5.12	2.18	10.58	2.65	6.59

وقد درس العالم Ohmachi [11] انتشار الأمواج فوق الصوتية الحجمية داخل بلورة الباراتولوريت، وبرهن على وجود سرعتين مميزتين للأمواج فوق الصوتية فيه. الأولى تنتشر بسرعة منخفضة 616 m/s باستقطاب عرضاني، والثانية طولانية الاستقطاب وتنتشر بسرعة كبيرة 4200 m/s. كما تبلغ الكتلة الحجمية  $\rho$  للبلورة  $6 \text{ g/cm}^3$ .

## 3- أنواع المرشحات فوق الصوتية - الضوئية من حيث نمط التداخل:

### 3-1- المرشح فوق الصوتي - الضوئي المولّف (AOTF) من النمط المتوازي [4]:

نلاحظ في هذا النمط أنّ المماسات عند نهاية أشعة الموجة الضوئية الواردة  $\vec{k}_i$  و المنحرفة  $\vec{k}_d$  تكون متوازية وهذا يظهر في الشكل (3) (الأشعة ذات النمط المنطبقة على المحور OX)، كما يظهر توازي الأشعة الضوئية مع الأشعة فوق الصوتية، وبالتالي لا يوجد أي فصل مكاني بين الأشعة الضوئية الواردة والمنحرفة. وهذا يخلق تعقيد عند توليد الموجة فوق الصوتية داخل البلورة وصعوبة في فصل الأشعة الضوئية عند الخرج.

### 3-2- المرشح فوق الصوتي - الضوئي المولّف (AOTF) من النمط غير المتوازي [4]:

إن الغالبية العظمى لأجهزة AOTF المتوفرة تجارياً و صناعياً في الوقت الحالي هي أجهزة غير متوازية . وإن المبدأ الأساسي لعمل هذا النوع من المرشحات يرتكز على التغيير في أدلة الانكسار كتابع لزاوية ورود، وهذا الأثر يستخدم ليعوّض عدم تطابق العزوم الذي يحدث بين شعاع الموجة الضوئية وشعاع الموجة فوق الصوتية عبر زاوية

قبول كبيرة عند الدّخل، وكما هو موضح في الشّكل ( 3 ) فإنّ التّصميم لهذه المرشحات يكون بشكل مشابه للنوع المتوازي وذلك بجعل المماسات عند نهاية أشعة الموجة الضوئية الواردة  $\vec{k}_1$  والمنحرفة  $\vec{k}_d$  (الأشعة ذات النمط متوازية).

### 3-3- المرشّح فوق الصّوتي-الضّوئي المولّف (AOTF) من النمط شبه المتوازي [12,13,14]:

في هذا النمط ينتشر الشعاع الضوئي بشكل قريب جداً من شعاع الموجة فوق الصوتية داخل البلورة المعتبرة، وتأتي أهمية هذا النمط من التداخل في حاجته إلى طاقة قيادة كهربائية منخفضة بالإضافة إلى إمكانية الحصول على انتخابية طيفية عالية.

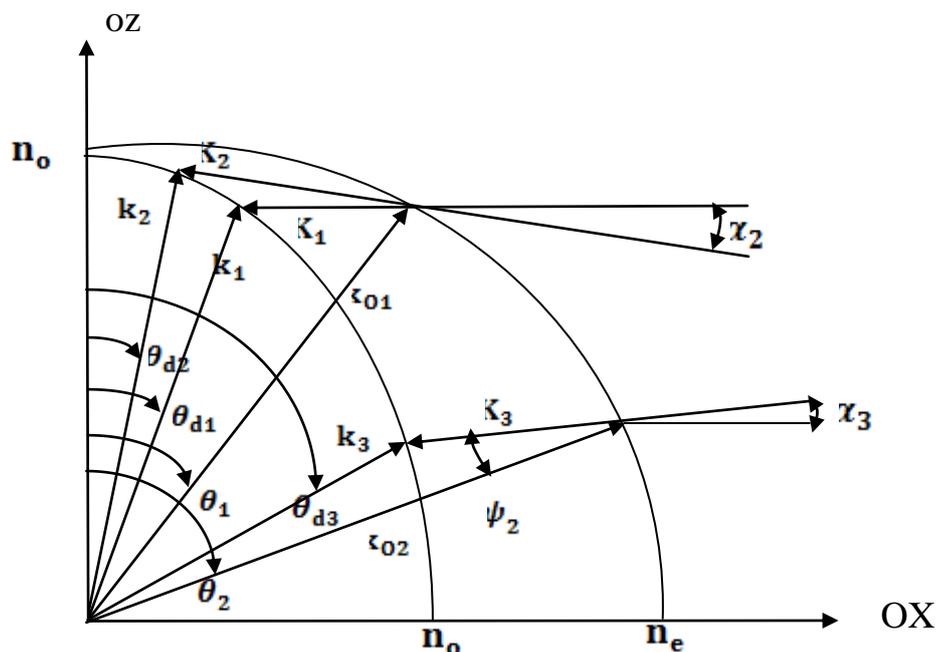
#### 4-دراسة عملية لمرشّح فوق صوتي - ضوئي مولّف وإظهار تأثير زاوية الانحراف:

ينحرف الضّوء في الأجهزة فوق الصّوتية-الضّوتية المستخدمة لبلورة  $\text{TeO}_2$  كوسط تداخل بواسطة موجة فوق صوتية عرضانية الاستقطاب ذات سرعة منخفضة تنتشر على طول المحور OX أو قريب من هذا الاتجاه، وإنّ اتجاه انتشار الصّوت في مستوى التداخل يحدد بزوايا انحراف تقاس بالنسبة للمحور OX بحيث أنّ  $(\alpha \leq 10^\circ)$ ، حيث أنّه من أجل هذه الاتجاهات لانتشار الموجة فوق الصوتية وفق المحور OX داخل بلورة  $\text{TeO}_2$  تكون قيم السرعة منخفضة وهذا يؤدي إلى الحصول على قيم عالية للعامل  $M_2$  وتعطى علاقة سرعة الموجة فوق الصوتية على الشّكل التّالي [11]:

$$V = \sqrt{\frac{(C_{11} - C_{12}) + (2C_{44} - C_{11} + C_{12}) \sin^2 \alpha}{2\rho}} \quad (3)$$

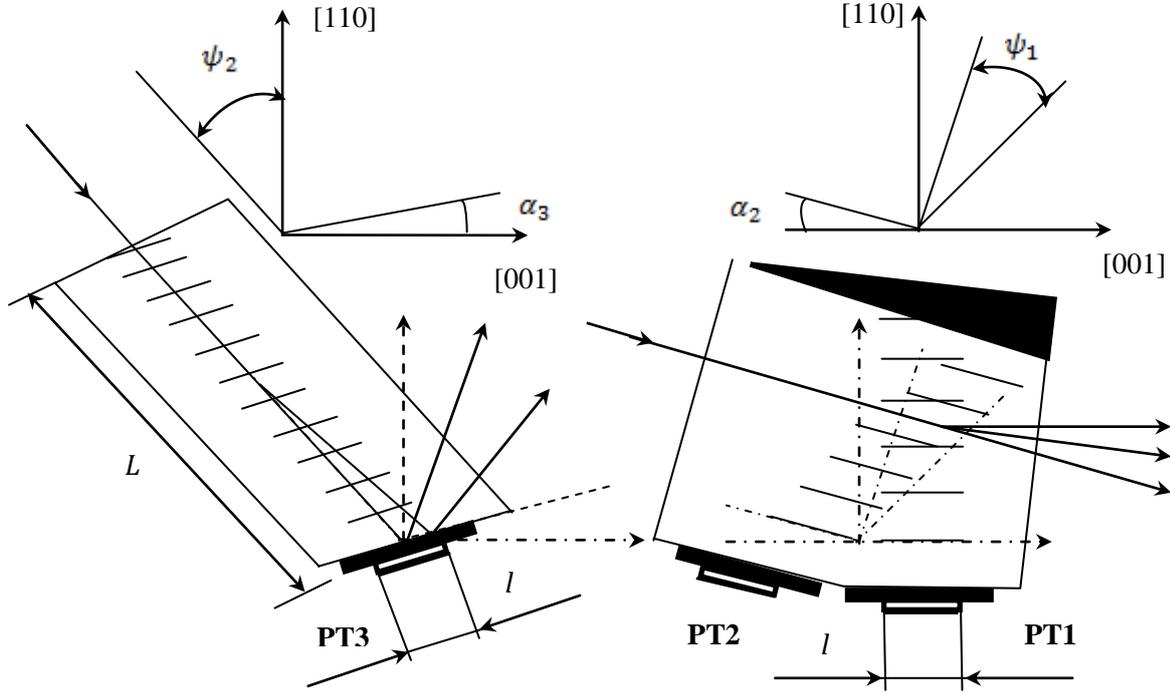
حيث  $\alpha$ : زاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية مقاسة بالنسبة للمحور OX، ونلاحظ أن قيمة السرعة تزداد بزيادة زاوية الانحراف  $\alpha$ .

ونلاحظ من خلال المخطط الشعاعي في الشّكل ( 4 ) أن الأشعة الضوئية الواردة مستقطبة شاقولياً وتقع على منحنى دليل الانكسار فوق العادي.



الشكل(4): مخطط أشعة الموجة للتداخل فوق الصوتي- الضوئي.

كما يبيّن الشكل (5) جهاز يعمل وفق نمط التداخل غير المتوازي حيث نلاحظ من خلال المخطط الشعاعي السابق (الشكل (4)) أن الشعاع الضوئي الوارد  $\vec{k}_{o1}$  يتداخل في هذا النوع من الأجهزة مع موجة فوق صوتية  $\vec{K}_1$  منتشرة على طول المحور OX (حيث  $(\alpha_1 = 0^\circ)$ ) أو يمكن أن يتداخل مع موجة فوق صوتية  $\vec{K}_2$  منتشرة على شبكة متجهة عند الزاوية  $\alpha_2 = 10.2^\circ$  (مقاسة بالنسبة لمحور موازي لـ OX)، أما بالنسبة لجهاز التداخل شبه المتوازي (المبيّن في الشكل (6)) فيظهر الشكل (4) أيضاً المخطط الشعاعي لهذه الأجهزة حيث نلاحظ انحراف الشعاع الضوئي الوارد  $\vec{k}_{o2}$  عند تداخله مع موجة فوق صوتية  $\vec{K}_3$  (منتشرة عند اتجاه  $\alpha_3 = -4.5^\circ$  (بضع درجات)) فنحصل بالتالي على شعاع الموجة الضوئية المنحرفة  $\vec{k}_3$ . لكن زاوية ورود الضوئية  $\theta_2$  في حالة جهاز التداخل شبه المتوازي مختلفة عن زاوية الورد  $\theta_1$  في حالة جهاز التداخل غير المتوازي بحيث أنّ  $\theta_2 > \theta_1$  [15].



الشكل (5): جهاز فوق صوتي- ضوئي غير متوازي.

الشكل (6): جهاز فوق صوتي- ضوئي شبه متوازي.

بالتعويض في العلاقة (3) نجد أن  $V_1 = 612 \text{ m/s}$  من أجل  $(\alpha_1 = 0^\circ)$ ،  $V_2 = 708 \text{ m/s}$  من أجل  $(\alpha_2 = 10.2^\circ)$ ،  $V_3 = 632 \text{ m/s}$  من أجل  $(\alpha_3 = -4.5^\circ)$  وذلك بعد تعويض قيم الثوابت المرنة والكتلة الحجمية للبلورة.

هي أطوال أشعة الموجة الضوئية الواردة باستقطاب شاقولي حيث:  $k_{o2}$ ،  $k_{o1}$

$$k_{o2} = 2\pi n_2 / \lambda, \quad k_{o1} = 2\pi n_1 / \lambda$$

حيث:  $k_3$ ،  $k_2$ ،  $k_1$  هي أطوال الأشعة الضوئية المنحرفة حيث:  $k_1 = k_2 = k_3 = 2\pi n_o / \lambda$

زوايا ورود الموافقة للأشعة الضوئية الواردة  $\vec{k}_{o1}$ ،  $\vec{k}_{o2}$  على الترتيب، وهي مقاسة بالنسبة للمحور

البصري للبلورة OZ.

زوايا الانحراف الموافقة للأشعة الضوئية المنحرفة  $\vec{k}_1$ ،  $\vec{k}_2$ ،  $\vec{k}_3$  على الترتيب وتقاس

أيضاً بالنسبة للمحور OZ.

$\lambda$ : طول الموجة الضوئية.

$n_o$ : قيمة دليل الانكسار العادي.  $n_e$ : قيمة دليل الانكسار فوق العادي.

بينما قيم أدلة الانكسار  $n_1$  و  $n_2$  فهي تعطى بالعلاقين التاليين:

$$n_1 = n_o n_e [n_e^2 \cos^2 \theta_1 + n_o^2 \sin^2 \theta_1]^{-1/2} \quad (4)$$

$$n_2 = n_o n_e [n_e^2 \cos^2 \theta_2 + n_o^2 \sin^2 \theta_2]^{-1/2} \quad (5)$$

الصوتية حيث أن:  $K_3$  ،  $K_2$  ،  $K_1$  هي أطوال أشعة الموجة فوق الصوتية المعتمدة على سرعة الطور وتردد الموجة فوق الصوتية حيث أن:

$$K_3 = 2\pi f_3 / V_3(\alpha_3) , \quad K_2 = 2\pi f_2 / V_2(\alpha_2) , \quad K_1 = 2\pi f_1 / V_1$$

$\psi_2$  ،  $\psi_1$ : زاويتي اتجاه تدفق الطاقة (وهي الزاوية بين اتجاه انتشار الطاقة الصوتية والكمية الموجة للشعاع الصوتي) [16,17]، والتي تنشأ من تباين الخواص الصوتية للبلورة وتعطى بالعلاقة التالية [13]:

$$\psi(\alpha) = \arctan \left[ \frac{(2C_{44} - C_{11} + C_{12}) \tan \alpha}{C_{11} - C_{12} + 2C_{44} \tan^2 \alpha} \right] \quad (6)$$

وبالتالي بالتعويض بقيمة  $\alpha_2 = 10.2^\circ$  نجد أن  $\psi_1 = 54.53^\circ$ ، بينما عندما  $\alpha_3 = -4.5^\circ$  نجد أن  $\psi_2 = 38.32^\circ$  و بالتالي تحسب زاويتي ورود الموافقتين من خلال العلاقتين التاليتين:

$$\theta_1 \approx \frac{\pi}{2} - (\psi_1 + |\alpha_2|) \quad (7)$$

$$\theta_2 \approx \frac{\pi}{2} - (\psi_2 + |\alpha_3|)$$

وبعد التعويض في العلاقة السابقة نجد أن  $\theta_1 = 25.27^\circ$  و  $\theta_2 = 47.18^\circ$  وهما القيمتين اللتين اعتمدنا للدراسة في بحثنا هذا.

ووفقاً لمبدأ مصونية الطاقة فإن شرط تزامن براغ خلال التداخل فوق الصوتي - الضوئي يعطى بالعلاقة:

$$k_{o1} + K_1 = k_1 ; k_{o1} + K_2 = k_2 ; k_{o2} + K_3 = k_3 \quad (8)$$

نجد من خلال ما سبق أنه في الجهاز غير المتوازي فإن الشعاع  $\vec{K}_1$  فقط من أشعة الموجة فوق الصوتية يكون متعامد مع المحور البصري للبلورة (حالة  $\alpha_1 = 0^\circ$ ) بينما الشعاع  $\vec{K}_2$  فقط يدور بزاوية  $\alpha_2 = 10.2^\circ$ . أما في الجهاز الثاني (شبه المتوازي) فنجد أن التداخل يحدث عند الزاوية  $\alpha_3 = -4.5^\circ$ ، والجدير بالذكر أن أشعة الموجة فوق الصوتية  $\vec{K}_2$ ،  $\vec{K}_3$  تتحرف باتجاهات متعكسة بالنسبة لشعاع الموجة فوق الصوتية  $\vec{K}_1$  الموازي للمحور OX. بإسقاط الأشعة السابقة  $\vec{k}_1$ ،  $\vec{k}_2$ ،  $\vec{k}_3$  على محور عمودي على شعاع الموجة فوق الصوتية أخذين بعين الاعتبار الزوايا الموضحة في الشكل (4) نجد:

$$n_o \cos(\theta_{d1}) = n_1 \cos(\theta_1) \quad (9)$$

وبإسقاط الأشعة نفسها على محور منطبق على  $\vec{K}_1$  نجد:

$$n_o \sin(\theta_{d1}) + \frac{\lambda f_1}{V_1} = n_1 \sin(\theta_1) \quad (10)$$

من العلاقتين السابقتين نجد أن:

$$f_1 = \frac{V_1}{\lambda} \left[ n_1 \sin \theta_1 - (n_o^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1)^{1/2} \right] \quad (11)$$

وبنفس الطريقة نجد أن:

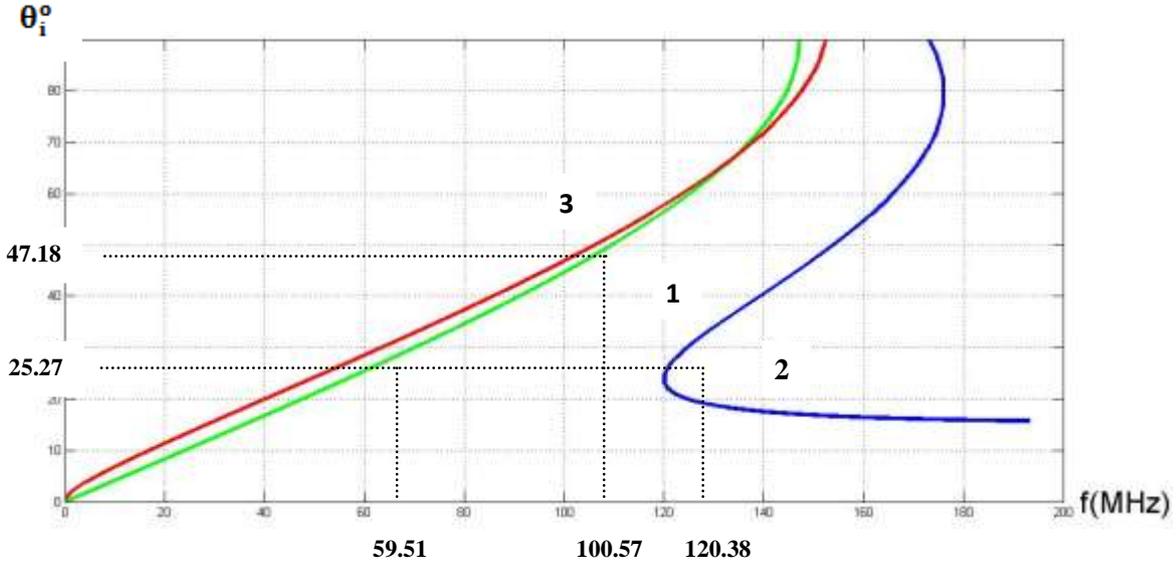
$$f_2 = \frac{V_2}{\lambda} \left[ n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_2) - (n_o^2 - n_1^2 \cos^2(\theta_1 - \alpha_2))^{1/2} \right] \quad (12)$$

$$f_3 = \frac{V_3}{\lambda} \left[ n_2 \sin(\theta_2 + |\alpha_3|) - (n_o^2 - n_2^2 \cos^2(\theta_2 + |\alpha_3|))^{1/2} \right] \quad (13)$$

### النتائج والمناقشة:

نختار للدراسة  $\lambda = 633\text{nm}$  حيث أن هذه القيمة واقعة ضمن مجال تمرير بلورة الباراتولوريت للأموج الضوئية بالإضافة إلى أنه تبين من خلال التجارب العلمية أن الشعاع الضوئي المنبعث عند طول الموجة هذه من منبع ليزري (هيليوم - نيون He-Ne) يصل بشكل مباشر إلى خلية التداخل وبالتالي بالتعويض في العلاقة (2) نجد أن:  $n_o = 2.26$  و  $n_e = 2.41$ .

وتمنحجة علاقات التردد السابقة بواسطة برنامج الماتلاب نحصل كما هو مبين في الشكل (7) على منحنى (1) عند الزاوية  $\alpha_1 = 0^\circ$  ، ومنحنى (2) عند الزاوية  $\alpha_2 = 10.2^\circ$  ، ومنحنى (3) عند الزاوية  $\alpha_3 = -4.5^\circ$ .



الشكل (7): منحنيات التردد بتبعية زاوية براغ للورود من أجل  $\lambda = 633\text{nm}$ .

و نلاحظ وجود نظامين للانحراف في الجهاز غير المتوازي:  
النظام الأول: يتميز بأن منحنى التردد  $f$  بتبعية زاوية الورود  $\theta(f)$  يملك مشتق  $df/d\theta$  ذو قيمة مغايرة للصفر أي يكون ميل المماس عند أي نقطة من منحنى التردد  $f$  غير مساو للصفر (المنحنى 1).  
أما النظام الثاني الموصوف بالمنحنى (2) فيملك نقطة حرجة يكون عندها المشتق مساو للصفر ( $df/d\theta = 0$ ) أي أن المماس عند هذه النقطة يكون عمودي على محور التردد وبالتالي يكون ميله معدوم.  
وبما أنه في حالة الجهاز غير المتوازي تكون قيمة زاوية الورود للشعاع الضوئي ( $\theta_1 = 25.27^\circ$ ) كما هو موضح في الشكل (4) فنجد بعد التعويض في العلاقة (4) ثم علاقة  $f_1$  و  $f_2$  أن شرط تزامن براغ يتحقق أوتوماتيكياً عند قيمتي التردد  $f_1 = 59.51\text{ MHz}$  (الواقعة على المنحنى (1)) و  $f_2 = 120.38\text{ MHz}$  (الواقعة على المنحنى (2)).

وبالتالي عندما يحدث الانحراف عند التردد  $f = f_2 = 120.38\text{ MHz}$  نجد أن هذا يوافق مجال زاوي واسع إلى حد ما. أي أن تغير زاوية الورود على مجال زاوي صغير بجوار القيمة  $25.27^\circ$  يحافظ على قيمة التردد الموافق إلى حد كبير.

بينما على نحو مغاير عندما يحدث الانحراف عند التردد  $f = f_1 = 59.51 \text{ MHz}$  فنلاحظ أنّ هناك حساسية كبيرة جداً في منحنى التردد (1) لتغيرات الزاوية  $\theta_1$ ، وبالتالي يصاحب هذا النوع من التداخل في الأجهزة غير المتوازنة تزايد خطي لحزمة تردد الانحراف  $\Delta f_1$  مع تزايد الفتحة الزاوية الضوئية  $\Delta\theta$ . وتتميز الأوساط متباينة الانحراف بإمكانية حدوث الانحراف مع حساسية منخفضة لتغيرات زاوية الورد، وهذا النوع من التداخل في بلورة  $\text{TeO}_2$  شائع الاستخدام في عالم الالكترونيات الضوئية. كمثال على ذلك الترشيح الطيفي للأشعة الضوئية غير المتوازنة وغير المتماكة بشكل جيد من أجل معالجة الصور في مناطق الطيف المرئية وتحت الحمراء.

من أجل الأشعة الضوئية المترابطة والمتوازنة فإن فعالية التداخل بين الأشعة الضوئية و فوق الصوتية تكون ضمن حزمة الترددات فوق الصوتية  $\Delta f$ ، وهذه الحزمة تنشأ من عدم التطابق للكميات الموجهة للأشعة الموجية بسبب حدود منطقة التداخل للمرشح AO، وفي الجهاز غير المتوازي فإن حزم تردد الانحراف  $\Delta f_1, \Delta f_2$  تعتمد على أبعاد الأعمدة الصوتية، حيث أنّ عرض هذه الأعمدة يحدد بشكل رئيسي عن طريق أبعاد المبدلات فوق الصوتية  $l$ ، حيث  $l$  هو طول منطقة التداخل (طول مبدل الأمواج فوق الصوتية) والذي يكون تابع لزاوية الورد  $\theta_1$  و الزاوية  $\psi_1$ . بالنتيجة عندما يحدث الانحراف على شبكة متوضعة على طول المحور OX فإن حزمة التردد تعطى بالعلاقة التالية [15]:

$$\Delta f_1 = \frac{0.8n_1V_1^2 \cos \theta_1}{(n_1V_1 \sin \theta_1 - \lambda f_1)l} \quad (14)$$

أما إذا كان الانحراف يحدث عند الشبكة الثانية (المتوضعة عند الزاوية  $\alpha_2 = 10.2^\circ$ ) فعندها حزمة التردد تعطى بالعلاقة [15]:

$$\Delta f_2 = \frac{0.8V_2}{l \cos \psi_1} \left[ \frac{n_1V_2 \cos(\theta_1 - \alpha_2 - \psi_1) - \lambda f_2 \sin \psi_1}{n_1V_2 \sin(\theta_1 - \alpha_2) - \lambda f_2} \right] \quad (15)$$

باعتبار أنّ  $l = 0.5 \text{ cm}$ ،  $\theta_1 = 25.27^\circ$ ،  $f_1 = 59.51 \text{ MHz}$ ،  $f_2 = 120.38 \text{ MHz}$  فإن حزم تردد الانحراف تحسب بعد التعويض في العلاقاتين السابقتين ونجد أنّ:  $\Delta f_1 = 0.22 \text{ MHz}$  و  $\Delta f_2 = 0.67 \text{ MHz}$

وبالتالي يحسب عامل الجودة في الحالتين السابقتين :

$$Q_1 = \frac{f_1}{\Delta f_1} = \frac{59.51 \text{ MHz}}{0.22 \text{ MHz}} \approx 270$$

$$Q_2 = \frac{f_2}{\Delta f_2} = \frac{120.38 \text{ MHz}}{0.67 \text{ MHz}} \approx 180$$

ولكنّ العمل على أشعة ضوئية غير متوازنة (الشكل 5) يكون مصحوب باتساع كاف لحزمة التردد  $\Delta f_1$  و زيادة صغيرة في حزمة التردد  $\Delta f_2$ ، حيث إذا كانت الفتحة الضوئية ( $\Delta\theta$ ) في البلورة مساوية للقيمة  $2.6^\circ$  فنحسب عندئذ قيم  $f_1, f_2, \Delta f_1, \Delta f_2$  عند القيمتين  $23.97^\circ, 26.57^\circ = 25.27^\circ \mp \frac{\Delta\theta}{2}$  وبالتالي بطرح قيمتي التردد  $f_1$  عند الزاويتين السابقتين مضافاً إليها قيمتي الانحراف  $\Delta f_1$  المرافقتين نحصل على حزمة الانحراف الترددي  $\Delta f_1 = 6.29 \text{ MHz}$  عندما  $\Delta\theta = 2.6^\circ$  وبنفس الطريقة نحصل على  $\Delta f_2 = 2.49 \text{ MHz}$  عندما  $\Delta\theta = 2.6^\circ$ ، وهذا ما يؤكد التزايد الكبير في حزمة التردد  $\Delta f_1$  وذلك بسبب حساسية منحنى  $f_1$  الكبيرة لتغيرات زاوية الورد  $\theta_1$  وهذا بدوره يؤدي إلى تناقص عامل الجودة  $Q_1$  بشكل كبير، بينما منحنى  $f_2$  الذي يسمح بتغيرات زاوية الورد  $\theta_1$  إلى جوار قيمتها مع المحافظة على قيمة التردد بشكل تقريبي جداً يكون مصحوب بتزايد أقل

بكثير في حزمة التردد  $\Delta f_2$  مقارنة مع  $\Delta f_1$  وبالتالي التناقص في عامل الجودة  $Q_2$  يكون أقل بكثير من الحالة السابقة ، وتكون قيمتي عامل الجودة في هذه الحالة:

$$Q_1(\Delta\theta = 2.6^\circ) = \frac{f_1}{\Delta f_1(\Delta\theta=2.6^\circ)} = \frac{59.51\text{MHz}}{6.29 \text{ MHz}} \approx 9$$

$$Q_2(\Delta\theta = 2.6^\circ) = \frac{f_2}{\Delta f_2(\Delta\theta=2.6^\circ)} = \frac{120.38\text{MHz}}{2.49 \text{ MHz}} \approx 48$$

ويمكن تلخيص النتائج السابقة في الجدول التالي:

الجدول (3): قيم عامل الجودة الموافقة لتغيرات زاوية الانحراف والفتحة الضوئية معاً من أجل  $\lambda = 633\text{nm}$ .

$Q_1 \approx 270$	$\alpha = \alpha_1 = 0^\circ, \Delta\theta = 0^\circ$
$Q_1 \approx 9$	$\alpha = \alpha_1 = 0^\circ, \Delta\theta = 2.6^\circ$
$Q_2 \approx 180$	$\alpha = \alpha_2 = 10.2^\circ, \Delta\theta = 0^\circ$
$Q_2 \approx 48$	$\alpha = \alpha_2 = 10.2^\circ, \Delta\theta = 2.6^\circ$

ونلاحظ مما سبق أنه في حال تداخل الضوء على الشبكة الأولى ( $\alpha = \alpha_1 = 0^\circ$ ) فإن عامل الجودة  $Q_1$  يتناقص بمقدار 30 مرة عندما تتزايد  $\Delta\theta$  من القيمة  $0^\circ$  إلى القيمة  $2.6^\circ$  ، بينما عند الانحراف على شبكة عند الزاوية ( $\alpha = \alpha_2 = 10.2^\circ$ ) فإن عامل الجودة  $Q_2$  يتناقص بحوالي 4 مرات تقريباً فقط عند نفس التزايد السابق لـ  $\Delta\theta$ .

وتحسب قيمة الفتحة الضوئية الخارجية بالعلاقة [15]:

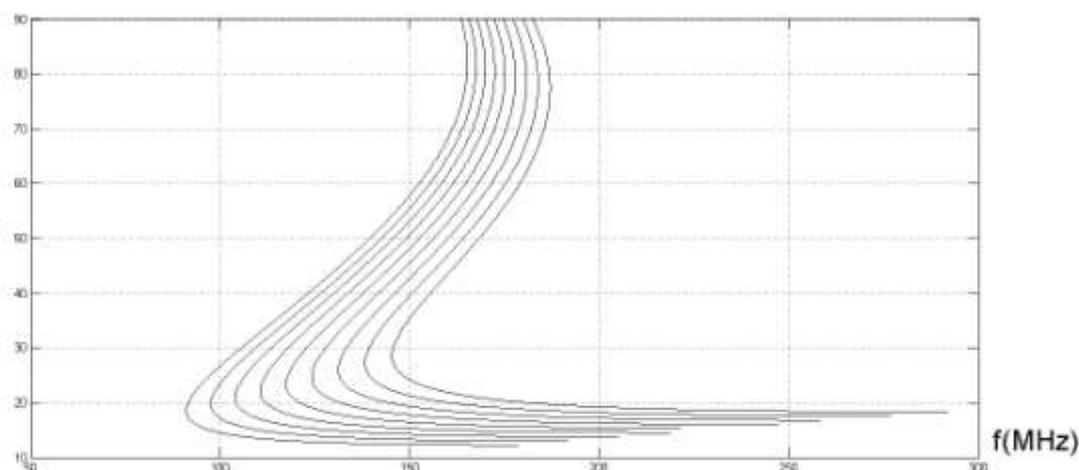
$$\varphi = n_1 \Delta\theta = 2.28 \times 2.6^\circ = 5.9^\circ \quad (16)$$

وبالتالي نستنتج مما سبق أنه يمكن إحداث تغيرات كافية في عامل الجودة عند استخدام النوع الأول من التداخل (التداخل غير المتوازي) دون إحداث تعديلات في الجهاز ، وذلك عن طريق التحكم بزاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية وسرعتها كما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول (4): قيم عامل الجودة الموافقة لزاويا الانحراف من أجل  $\lambda = 633\text{nm}$ .

$\alpha(^{\circ})$	8	8.5	9	9.5	10	10.2	10.5	11	11.5	12
$Q$	259	236	217	200	185	180	171	157	144	129

وبين الشكل (8) منحنيات التردد الموافقة لزاويا الانحراف السابقة ونلاحظ أن جميع هذه المنحنيات تملك نقطة حرجة يكون عندها المشتق مساوٍ للصفر ، وبالتالي تكون قيمة التردد عند هذه النقطة غير حساسة لتغيرات زاوية الورد.

$\theta_i$ 

الشكل (8): منحنيات التردد بتبعية زاوية براغ للورود للجهاز غير المتوازي عند قيم مختلفة لزاوية الانحراف. تعتمد النظرية السابقة على هندسة بسيطة للتداخل غير المتوازي من أجل الترشيح الضوئي، وتستخدم مبدل موجة فوق صوتية واحد يتم توليفه في كل مرة على التردد المناسب من أجل اختيار خصائص حزمة التمرير المتغيرة، والنتائج التي تم الحصول عليها من تصميم هذا المرشح (AO) تبيّن الخصائص الهامة لهذا النوع من المرشحات. وبالرجوع إلى المخطط الشعاعي في الشكل (3) نجد أنه يمكن التعبير بشكل مبسط عن العلاقة بين الزاويتين  $\theta_i$  و  $\theta_a$  كما يلي [18]:

$$\tan \theta_i \tan(\theta_a - \theta_i) = 2 \quad (7)$$

من أجل  $\theta_i = 25.27^\circ$  (في حالة الجهاز غير المتوازي) نجد بعد التعويض في العلاقة السابقة أن  $\theta_a = 102.02^\circ$  وذلك عندما  $\alpha = 10.2^\circ$ ، أما عندما  $\alpha = 0^\circ$  فعندها تكون  $\theta_a = 90^\circ$  لأن شعاع الموجة فوق الصوتية في هذه الحالة يكون موازي للمحور OX عمودي على المحور البصري للبلورة). إن المعادلة السابقة هي علاقة هندسية تتجاهل أي اعتماد على طول الموجة الضوئية ونوعية وسط التداخل عند كل عنصر من مصفوفة مبدلات الموجة فوق الصوتية طالما الأطوار تبقى ثابتة.

كما يظهر الشكل (6) الانحراف متباين الخواص للأشعة الضوئية مع الأشعة فوق الصوتية في الجهاز شبه المتوازي حيث يمكن عن طريق التحكم بزاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية التحكم في الزاوية  $\psi_2$  وبالتالي الحصول على زاوية ورود  $\theta_2$  لتضبط بدورها الانتشار شبه المتوازي للشعاع الضوئي الوارد مع شعاع الموجة فوق الصوتية وهذا يظهر في الشكل (4)، و بعد تعويض  $\alpha_3 = -4.5^\circ$  و  $\psi_2 = 38.32^\circ$  في العلاقة (7) نجد أن  $\theta_2 = 47.18^\circ$  وهي بدورها تحقق التداخل شبه المتوازي في البلورة.

وإن تردد الموجة فوق الصوتية الواجب تطبيقها على مبدل الأمواج فوق الصوتية حتى يحصل الانحراف للشعاع الضوئي بحسب من العلاقة (13) وبعد تعويض  $\theta_2$  بالقيمة  $47.18^\circ$  نحصل على  $f_3 = 100.57\text{MHz}$ . ويظهر الشكل (7) أن منحنى التردد لنظام الانحراف شبه المتوازي مشابه لمنحنى التردد في الحالة  $\alpha_1 = 0^\circ$  للجهاز غير المتوازي، ويتميز باعتماد خطي لحزمة التردد على الفتحة الزاوية لأن المشتق هنا مغاير للصفر  $(df/d\theta \neq 0)$ .

من خلال تحليل التداخل شبه المتوازي نؤكد اعتماد حزمة تردد الانحراف على طول التداخل للمرشح AO، ولكن من أجل هذه الحالة كما يظهر في الشكل (6) فإن هذا الطول يحدد بشكل أساسي بحجم الكريستال  $L$  وليس بالبعد / للمبدل فوق الصوتي PT3 و تعطى حزمة تردد الانحراف بالعلاقة التالية [15]:

$$\Delta f_3 = 0.6 f_3 L \cos \psi_2 / V_3 \quad (18)$$

من أجل  $L = 2.2 \text{ cm}$  وبالتعويض في العلاقة السابقة نجد أن  $\Delta f_3 = 34 \text{ kHz}$  وهي ذات قيمة صغيرة جداً مقارنة مع  $\Delta f_2$  و  $\Delta f_1$ .

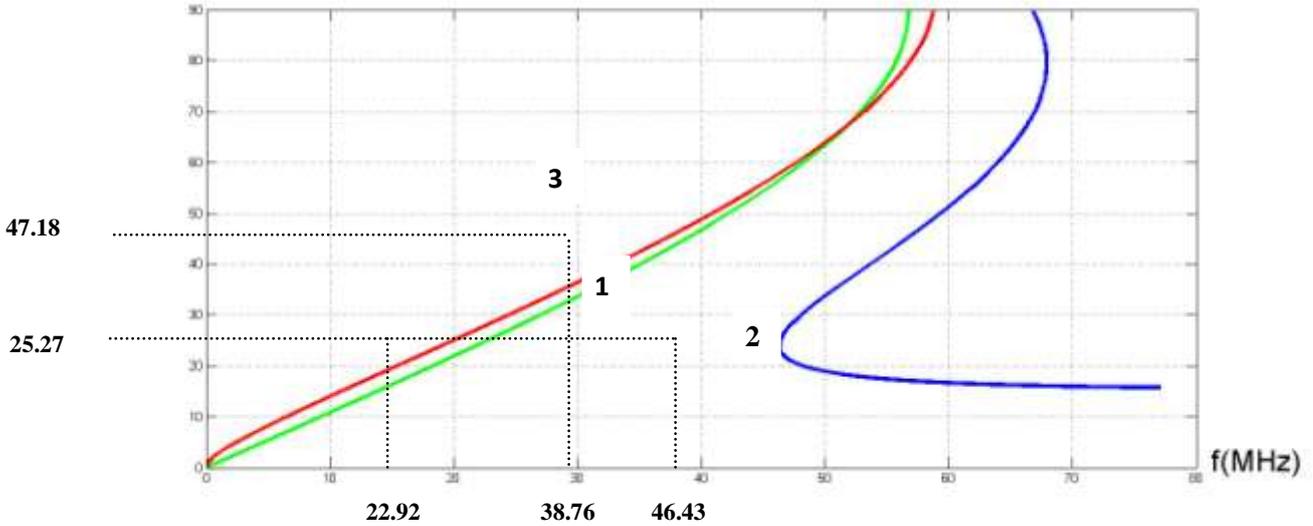
وبالتالي يعطى عامل الجودة بالعلاقة:

$$Q_3 = \frac{f_3}{\Delta f_3} = \frac{100.57 \text{ MHz}}{34 \text{ kHz}} = 2957$$

وهي قيمة كبيرة جداً مقارنة مع  $Q_1$  و  $Q_2$  (حالة التداخل غير المتوازي في الجهاز الأول) وهذا ما يقود إلى نتيجة أن التداخل شبه المتوازي يسمح بدرجة عالية جداً من تداخل نوع براغ، كما أن كفاءة الانحراف في الأجهزة التي تعمل وفق هذا النمط من التداخل تتفوق بدرجة كبيرة على غيرها من الأجهزة.

وبالرجوع إلى العديد من المقالات المنشورة سابقاً [2,3] نجد أن الحسابات التصميمية قد أنجزت ضمن النافذة C الضوئية (1530-1565nm) حيث تكون الضياعات داخل الليف الضوئي أحادي النمط لا تتجاوز 0.2 dB/km ولكن إذا قمنا بإعادة الحسابات السابقة عند طول موجة ضمن هذه النافذة (وليكن 1551nm) فإننا نحصل على منحنيات مشابهة تماماً من حيث الشكل للمنحنيات السابقة كما هو موضح في الشكل (9).

$\theta_i^\circ$



الشكل (9): منحنيات التردد بتبعية زاوية براغ للورود من أجل  $\lambda = 1551 \text{ nm}$ .

أما قيم عامل الجودة عند القيم السابقة المختلفة لزاوية الانحراف فتوضح كما في الجدول التالي:

الجدول (5): قيم عامل الجودة الموافقة لتغيرات زاوية الانحراف من أجل  $\lambda = 1551\text{nm}$ .

$\alpha(^{\circ})$	8	8.5	9	9.5	10	10.2	10.5	11	11.5	12
Q	99	91	83	77	71	69	66	60	55	49

ونلاحظ أنّ هذه القيم أقل بكثير من القيم التي حصلنا عليها عند اعتماد طول الموجة  $633\text{nm}$ ، وهذا ما يفسّر أيضاً إجراء هذا البحث عند طول الموجة هذه حيث أنّها تسمح بالحصول على قيم أعلى لعامل الجودة مقارنة مع أطوال موجة النافذة C، أمّا عندما تتزايد  $\Delta\theta$  من القيمة  $0^{\circ}$  إلى القيمة  $2.6^{\circ}$  فإنّ عامل الجودة ينخفض أيضاً بشكل كبير وهذا موضّح في الجدول التالي:

الجدول (6): قيم عامل الجودة الموافقة لتغيرات زاوية الانحراف والفتحة الضوئية معاً من أجل  $\lambda = 1551\text{nm}$ .

$Q_1 \approx 103$	$\alpha = \alpha_1 = 0^{\circ}, \Delta\theta = 0^{\circ}$
$Q_1 \approx 8$	$\alpha = \alpha_1 = 0^{\circ}, \Delta\theta = 2.6^{\circ}$
$Q_2 \approx 69$	$\alpha = \alpha_2 = 10.2^{\circ}, \Delta\theta = 0^{\circ}$
$Q_2 = 26$	$\alpha = \alpha_2 = 10.2^{\circ}, \Delta\theta = 2.6^{\circ}$

### الاستنتاجات والتوصيات:

درس البحث نموذجين للمرشحات فوق الصوتية- الضوئية أحدهما يعمل وفق النمط غير المتوازي للتداخل والآخر يعمل وفق النمط شبه المتوازي وذلك بهدف المقارنة بينهما من حيث النتائج العملية، وبالتالي وضّح البحث تأثير زاوية الانحراف الموجة فوق الصوتية ( $\alpha$ ) على تصميم وبارامترات المرشّح.

#### ففي حالة الجهاز غير المتوازي:

عندما تكون  $\alpha = 0^{\circ}$  (الموجة فوق الصوتية ترد بشكل موازي للمحور OX) فإنّ منحنى التردد يكون حسّاس جداً لتغيرات زاوية الورد وبالتالي عندما تكون زاوية الورد  $\theta_1 = 25.27^{\circ}$  والفتحة الضوئية ( $\Delta\theta = 0^{\circ}$ ) فإنّ حزمة تردد الانحراف  $\Delta f_1$  تكون صغيرة جداً ( $0.22\text{MHz}$ ) وهذا يعطي قيمة كبيرة لعامل الجودة ( $270$ )، بينما ينخفض عامل الجودة إلى القيمة ( $9$ ) أي بمقدار  $30$  مرة عندما تصبح الفتحة الضوئية ( $\Delta\theta = 2.6^{\circ}$ ) وذلك بسبب اتساع حزمة تردد الانحراف بشكل كبير ( $6.29\text{MHz}$ ) وهذا ما يؤكّد فعالية هذا المرشّح عند جعل ( $\Delta\theta = 0^{\circ}, \alpha = 0^{\circ}$ ) وذلك عند عمله وفق النمط غير المتوازي.

بينما عندما تكون  $\alpha = 10.2^{\circ}$  و  $\Delta\theta = 0^{\circ}$  فإنّ منحنى التردد يكون مختلف بشكل كبير عن الحالة السابقة ويوافق مجال زاوي واسع إلى حد ما، أي أن تغيير زاوية الورد على مجال صغير بجوار قيمتها يحافظ على قيمة التردد الموافق إلى حد كبير، وبالتالي عند نفس القيمة السابقة لزاوية الورد  $\theta_1 = 25.27^{\circ}$  تكون حزمة تردد الانحراف ذات قيمة أكبر ( $0.67\text{MHz}$ ) نظراً لعدم حساسية هذا المنحني إلى تغيرات  $\theta_1$  وهذا يؤدي إلى انخفاض عامل الجودة إلى القيمة ( $180$ ) عن الحالة السابقة ( $270$ )، ولكن عندما تصبح  $\Delta\theta = 2.6^{\circ}$  فإن حزمة التردد تتسع بشكل مقبول (على خلاف حالة  $\alpha = 0^{\circ}$ ) فتصبح ( $2.49\text{MHz}$ ) وبالتالي عامل الجودة ينخفض إلى القيمة ( $48$ ) أي ينخفض بحوالي  $4$  مرات تقريباً فقط في هذه الحالة، وعند متابعة الدراسة عند قيم مختلفة لزاوية الانحراف نلاحظ انخفاض عامل الجودة بتزايد قيمة هذه الزاوية.

كما بين هذا البحث أنّ العمل على طول الموجة 633nm في حالة الجهاز غير المتوازي يسمح بالحصول على قيم أعلى بكثير لعامل الجودة مقارنة مع أطوال موجة النافذة C، وبالتالي يمكن إحداث تغييرات كافية في عامل الجودة عند استخدام الأجهزة التي تعمل وفق هذا النمط من التداخل دون إحداث تعديلات في الجهاز وذلك عن طريق تبديل إشارات القيادة الكهربائية المطبقة على مبدل الأمواج فوق الصوتية PT1 و PT2.

#### أما في حالة الجهاز شبه المتوازي:

يتم اختيار زاوية الانحراف بحدود  $4.5^\circ$  مما يجعل شعاع الموجة فوق الصوتية ينتشر بشكل قريب جداً من شعاع الموجة الضوئية وبالتالي نحصل على التداخل شبه المتوازي، ونجد أنّ حزمة التردد هنا صغيرة القيمة جداً (34kHz) وهذا يوافق قيمة كبيرة جداً لعامل الجودة (2957) مقارنة مع حالة الجهاز غير المتوازي وهذا ما يقود إلى نتيجة أنّ التداخل شبه المتوازي يسمح بدرجة عالية جداً من تداخل نوع براغ.

نستنتج مما سبق أنّ التداخل شبه المتوازي يحقق قيمة عالية جداً لعامل الجودة، وبالتالي تكون فعاليته في انتخاب طول الموجة المرغوب هي الأفضل مقارنة مع التداخل غير المتوازي، كما لا تلعب الفتحة الضوئية في النمط شبه المتوازي دوراً في التأثير على فعالية المرشح على خلاف مرشحات النمط غير المتوازي.

يمكن متابعة العمل وفق عدة محاور أهمها:

- حساب حزم تردد الانحراف ودراسة تأثير الفتحة الضوئية للجهاز غير المتوازي عند القيم المختلفة لزاوية الانحراف من أجل التوصل إلى القيمة المثالية لزاوية الانحراف التي تحقق قيمة مرتفعة لعامل الجودة و تسمح في الوقت ذاته بمقدار معين من السماحية الزاوية.
- إعادة الدراسة السابقة عدّة مرات على الجهاز شبه المتوازي من أجل قيم مختلفة لزاوية الانحراف وذلك بهدف الوصول إلى القيمة المثالية لزاوية الانحراف التي تحقق القيمة الأعلى لعامل الجودة.
- تصميم مرشح فوق صوتي - ضوئي يعمل وفق نمطي التداخل غير المتوازي وشبه المتوازي معاً وذلك عن طريق التحكم بالبارامترين التاليين:
- ✓ زاوية الانحراف للموجة فوق الصوتية والتي تتحكم بدورها بسرعة هذه الموجة عند توليدها ضمن البلورة.
- ✓ زاوية ورود الشعاع الضوئي وذلك بضبط الليف الضوئي أمام المرشح وفقاً لهذه الزاوية.
- إعادة الدراسة على بلورة أخرى مماثلة في البنية مثل  $Hg_2Cl_2$  (calomel) ومقارنة النتائج.

#### المراجع:

- [1] SADOT, D.; BOIMOVICH , E. *Tunable Optical Filters for Dense WDM Networks*. IEEE Communications Magazine, Vol. 36, N<sup>o</sup>.12, 1998 ,50-55.
- [2] SAPRIEL ,J. ; CHARISSOUX, D.;VOLOSHINOV ,V.; MOLCHANOV, V. *Tunable Acoustooptic Filters and Equalizers for WDM Applications*. Journal of Light Wave Technology, Vol. 20, N<sup>o</sup>.5, 2002, 892-899.
- [3] MOLCHANOV, V.;MAKAROV, O. *Quasi collinear acousto optic filters using strong acoustic anisotropy in tellurium dioxide crystal*.Journal of Physics: Conference Series92, 2007.
- [4] PARK,L. *Acousto Optic Tunable Filters Basic Theory And Design Considerations* . ISOMET CORP U.S.A , Vol.5263.
- [5] KAUR,P.; KAUR,S. *Acousto Optic Tunable Filters*. International Journal Of Electronics& Communication Technology, Vol.6, N<sup>o</sup>.3, 2015, 64-67 .

- [6] MUROMETS ,A.V.; TRUSHIN,A.S. *Influence of acoustic field structure on polarization characteristics of acousto-optic interaction in crystals* . PhysicsProcedia, Vol.70, 2015, 721-724 .
- [7] YOUNG,E.H. ; YAO,S.K . *Design Considerations for Acousto-Optic Devices*. Proceedings of the IEEE ,Vol. 69, N<sup>o</sup>.1, 1981,54-64.
- [8] VOLOSHIN ,A.S. ; BALAKSHY,V.I. *Acousto-Optic Characteristics in Media with Strong Acoustic Anisotropy*. ACTA PHYSICA POLONICA A Russia, Vol.127, N<sup>o</sup>.1, 2015, 60-62 .
- [9] UCHIDA,N .*Optical Properties of Single-Crystal Paratellurite (TeO<sub>2</sub>)*. Phys. Rev.B, Vol. 4, N<sup>o</sup>.10, 1971 ,3736-3745.
- [10] MAKSIMENKA,R.; TOURNOIS,P. *Mid – Infrared High – Frequency High – Resolution Reflective Acousto-Optic Filters In Mercury Halides*. Optics Communications, Vol.285, N<sup>o</sup>. 5,2012 , 715-719 .
- [11] OHMACHI,Y.; UCHIDA ,N.; NIIZEKI,N. *Acoustic Wave Propagation In TeO<sub>2</sub> Single Crystal* . J.Acoustic.Soc.Am , Vol.51, N<sup>o</sup>.1, 1971 , 164-168.
- [12] VOLOSHINOV,V.B. *Close to collinear acousto-optical interaction in paratellurite*. Optical Engineering , Vol.31, N<sup>o</sup>.10, 1992,2089-2094.
- [13] MOLCHANOV ,V.Y. ; VOLOSHINOV,V. B. ; MAKAROV, O.Y. *Quasi-collinear tunable acousto-optic paratellurite crystal filters for wavelength division multiplexing and optical channel selection* . Kvantovaya Elektronika , Vol.39, N<sup>o</sup>.4, 2009, 353-360 .
- [14] MASLAKOV ,A.V. ; TRUSHIN,A.S. ; VOLOSHINOV,V.B. *Quasi-Collinear Acousto-Optic Interaction in Inhomogeneous Acoustic Field*. ACTA PHYSICA POLONICA A Russia, Vol.127, N<sup>o</sup>.1, 2015, 46-48 .
- [15] VOLOSHINOV, V.; MISHIN,D.; USKOV,A. *Acousto optical Devices Using Paratellurite for Optical Information Processing Systems*. SPIE Proceedings ,Soviet-Chinese Joint Seminar Russia , Vol.1731, 1991,297-302.
- [16] ZAKHAROV ,A.V. ; VOLOSHINOV,V.B. *Influence of Acoustic Anisotropy on Frequency Bandwidths of Bragg Diffraction in Two Orthogonally Polarized Diffraction Orders* . ACTA PHYSICA POLONICA A Russia , Vol.127, N<sup>o</sup>.1, 2015, 63-65 .
- [17] BALAKSHY ,V.I. ; VOLOSHIN,A.S.; MOLCHANOV,V.Y. *Influence of acoustic energy walk-off on acousto-optic diffraction characteristics*. Ultrasonics, Vol.59, 2015, 102-108 .
- [18] SIVANAYAGAM,A. ; FINDLAY,D. *High resolution non collinear acousto optic filters with variable passband characteristics :design* . APPLIED OPTICS U.S.A ,Vol. 23, N<sup>o</sup>.24, 1984,4601-4608 .