

نمذجة ومحاكاة تقانات الترشيح الضوئي في حلقة التغذية العكسية لليزر ليفي

د. علي حسن *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٤ / ٥ / ١٤ - تاريخ النشر ٢٠٢٤ / ٧ / ١٤)

□ ملخص □

تلعب الليزرات الليفية دوراً مهماً في التطبيقات الصناعية المتعددة كذلك في الاتصالات الضوئية فائقة المسافة والسرعة، حيث تمتاز تقانة الليزر بأن مكوناتها متكاملة، وهذا التصميم مفضل ومرغوب من أجل الحساسات والمطيافية والاتصالات الضوئية.

تتطلب الاتصالات الضوئية، بشكل خاص، ليزراً يمكن التحكم بالعرض الطيفي له، كذلك المقدرة على تخميد الوريقات الثانوية لطيف الخرج بمستوى محدد. تركز الأبحاث والدراسات النظرية والعملية على استخدام تقنية ليف براغ [2,1]، وتقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية ضمن بلورة أحادية المحور البصري [3,4].

عمل البحث على نمذجة ومحاكاة نماذج متعددة لليف براغ، كذلك لمرشحات التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، وقارن أداء كل من التقنيتين من حيث العرض الطيفي وتخمد الوريقات الجانبية. استخدم البحث برنامج Optisystem v.17 وهو برنامج تستخدمه الشركات المصنعة للتقانات البصرية في مرحلة التصميم والاختبار للعناصر البصرية قبل التسويق. يتيح البرنامج نمذجة ومحاكاة تقانات الترشيح الضوئية في حلقة التغذية العكسية لليزر الليفي.

الكلمات مفتاحية: ليزر ليفي - ليف شبكية براغ - مرشح ضوئي - حلقة تغذية عكسية - أمواج فوق صوتية ضوئية.

* دكتور وباحث - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Modeling and Simulation of an Optical Filtration Techniques in the Feedback Loop of a Fiber Laser

Dr. Ali Hassan*

(Received 14/5/2024. Accepted 14/7/2024)

□ ABSTRACT □

Fiber lasers play an important role in a multitude of industrial applications, as well as in ultra-high-speed optical communications. In this field, laser technology is distinguished by its integrated components, and this design is preferred and desired for sensors, spectroscopy, and optical communications.

In particular, optical communication requires a laser with a controllable spectral width and the possibility to dampen the side lobe of the output spectrum with specific level. The theoretical and practical studies, and research focus on the use of the Bragg fibre technique [1,2], and the interaction between Acousto-Optic waves within an optical single crystal [3,4].

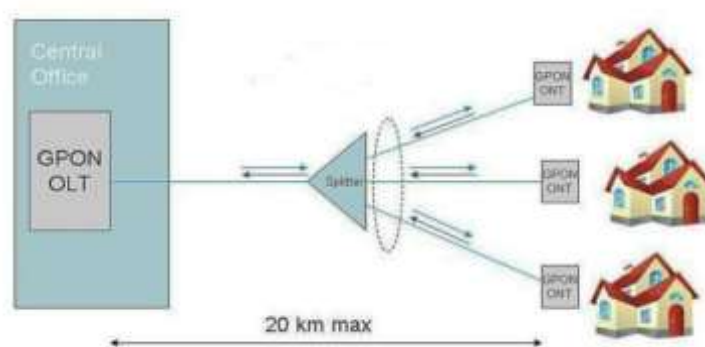
The research involved the modelling and simulation of multiple models of the Bragg fibre, as well as the interaction filters between Acousto-Optic waves. The performance of both technologies was then compared in terms of spectral width and damping of the side lobe. The research utilised Optisystem v.17, a software tool employed by manufacturers of optical technologies in the design and testing of pre-market optical elements. This software enables the modelling and simulation of optical filtration techniques within the fibre laser feedback loop.

Key words: Fiber Laser - Bragg fibre - optical filter - Feedback Loop - Acousto-Optic waves.

* Doctor and Researcher- Department of physics-Faculty of Sciences-Tishreen University-Lattakia-Syria.

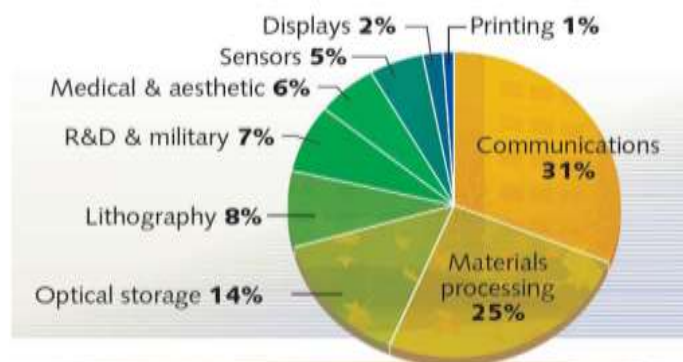
مقدمة:

أدى زيادة الطلب على الإنترنت وحاجة التطبيقات لمزيد من عرض الحزمة المستمر إلى تغييرات جذرية في بنية شبكات الاتصالات في العالم بأسره، سواءً على مستوى شبكات المسافات الطويلة، أي شبكات النقل (Transmission Network) التي تستخدم الكابلات البصرية العاطسة في أعماق البحار والمحيطات، أو على مستوى شبكات المسافات القصيرة، أي شبكات النفاذ الضوئية (Access Network). كل ذلك سبب عجزاً تاماً في تحقيق متطلبات العصر الحالي من حيث عرض الحزمة وجودة الاتصال، مما أدى إلى اندثار أنظمة النقل بالأسلاك النحاسية. يبين الشكل (1) البنية العامة لشبكات النفاذ الضوئية التي تعرف باسم شبكات xPON، أي الشبكات الضوئية غير الفعالة (السلبية) (Passive Optical Network – PON) التي لا تحتاج إلى أي مصدر تغذية على طول خط الإرسال.



الشكل (1): البنية العامة لشبكات النفاذ الضوئية التي تعرف باسم شبكات xPON.

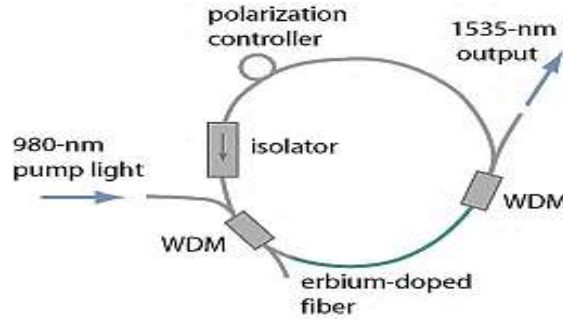
كل ما ذكر أعلاه من تطورات وتغييرات جذرية وثورة تقانة حقيقية في مجال الاتصالات ومجالات أخرى للعلوم يعتمد على تطور منظومات الليزر بمختلف أنواعه. يتطلب تطوير وتحسين منظومة الاتصالات عبر العالم ليزرات عالية الجودة منخفضة الكلفة، هنا يأتي دور الليزرات الليفية (Fiber Laser) في تنفيذ هذه المهمة. يبين الشكل (2) النسب التجارية المئوية لمختلف أنواع التطبيقات الليزرية، إذ تشكل ليزرات الاتصالات النسبة الأعلى على الإطلاق (تصل إلى ٣١%)، ذلك بسبب الحاجة الماسة لنشر شبكات xPON عبر العالم بأسره [5,6].



الشكل (2): النسب المئوية التجارية لمختلف أنواع التطبيقات الليزرية.

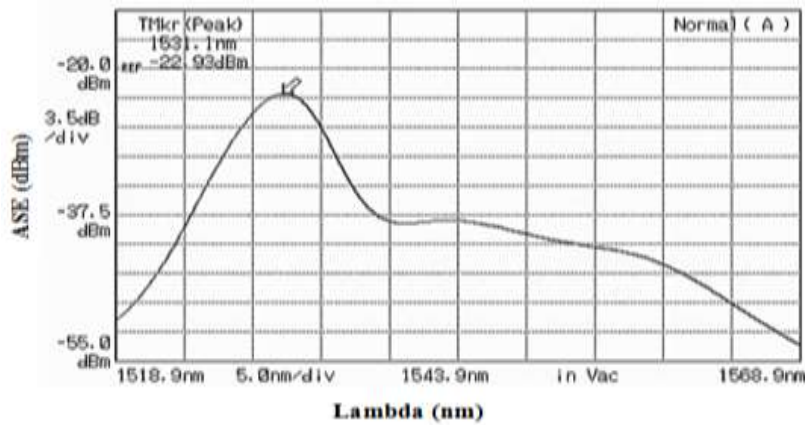
من بين التقنيات المختلفة لتصنيع ليزرات الاتصالات، امتازت تقانة الليزر الليفي بمواصفات ومزايا خاصة جعلته محط اهتمام الباحثين، وأدخلته في العديد من التطبيقات العلمية والتكنولوجية. يتميز تصميم الليزر الليفي بعدم

حاجته إلى مرابا، وبأن مكوناته متكاملة ومدمجة، فأهلتها هذه المواصفات لأن يكون المفضل في عالم الاتصالات الضوئية ذات السرعات العالية، والحساسات، والمطبيقات، والطب، وفي معالجة المواد [7-12]. يمكن تصميم المجابوب في ليزرات الألياف البصرية بأشكال عدّة ولكل شكل مزاياه الخاصة، ولا مجال لنا لذكرها أو التوسع بها في هذا البحث. يمثل نموذج المجابوب الدائري (الحلقي) باتجاه واحد (باستخدام عازل بصري) التصميم الأمثل لليزرات الليفية لتطبيقات الاتصالات الضوئية، وذلك باستخدام جامع ليفي لجمع إشارتي الضخ والتغذية العكسية (إشارة الليزر)، وباستخدام مقارن ليفي (يعمل كمرآة خرج) نحصل على الحزمة الليزرية كما يوضحه الشكل (3).



الشكل (3): مجابوب دائري لليزر ليفي.

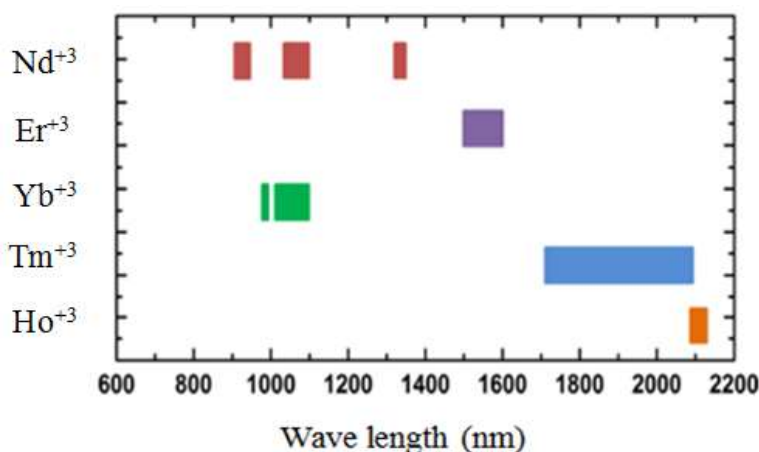
يمكن أيضاً استخدام نموذج الحلقة المفتوحة (Broken Ring) لليزر الليفي للحصول على منبع ضوئي غير مترابط عريض المجال (Incoherent Wide-Band Source)، الذي يعرف تقنياً بالإصدار التلقائي المضخم (Amplified Spontaneous Emission - ASE). يتغير منحنى ASE للحلقة المفتوحة بنفس تغير منحنى ربح المضخم المشابب بعناصر ترابوية نادرة (Rare Earth Elements)، ويبين الشكل (4) نموذج مخبري لمنحنى طيف منبع ASE غير المترابط الناتج عن ليف بصري مشابب بالإربيوم (Erbium) [13].



الشكل (4): طيف ASE الناتج من ضخ ليف بصري مشابب بالإربيوم (طيف حلقة مفتوحة).

تجدد الإشارة إلى أن منابع ASE تلك تمثل حاجة ضرورية لتطبيقات أنظمة التجميع بتقسيم الزمن عريضة المجال، واستطاعة منخفضة، وهذا ما تحققه منابع ASE الصادرة عن ضخ ألياف مشاببة بعناصر ترابوية نادرة.

من المميزات الهامة أيضاً للليزرات الليفية، إمكانية الحصول على عامل تضخيم للإشارة الضوئية ضمن طيف عريض من أطوال الموجة الضوئية تشمل جميع نوافذ الاتصالات المستخدمة، عن طريق تغيير نوع شاردة الإشابة إذ أنّ شاردة الإربيوم Er^{+3} تتيح استخدام نافذة الاتصالات (Conventional) "C-Band" التي يبلغ امتدادها الطيفي (1520 - 1565)nm، بينما الإشابة بشاردة الثوليوم Tm^{+3} (Thulium) يسمح لنا باستخدام نافذة الاتصالات (Short) "S-Band" التي يمتد مجالها (1460 - 1530) nm. وبدوره، فإن الإشابة بشاردة البراسيوديميوم Pr^{+3} (Praseodymium) يمكننا من العمل ضمن نافذة الاتصالات (Original) "O-Band" التي يبلغ امتدادها الطيفي (1260 - 1360) nm. يبين الشكل (5) إمكانية الانتقال من نافذة الاتصالات الضوئية إلى أخرى بتغيير نوع شاردة الإشابة لليف البصري.



الشكل (5): النافذة الضوئية المقابلة لكل شاردة إشابة.

١ - أهمية البحث وأهدافه:

في تطبيقات متعددة ومن أهمها الاتصالات الضوئية عبر الألياف البصرية وحيدة النمط فائقة المسافة، يؤثر العرض الطيفي لليزر المستخدم ومستوى الوريقات الجانبية مقاسة بالديسبل بشكل كبير على أداء أنظمة الاتصالات الضوئية، حيث تسعى الأبحاث دوماً إلى تصميم ليزرات عرضها الطيفي أقل ما يمكن، كذلك مستوى الوريقات الجانبية. يهدف البحث بشكل واضح إلى تحقيق مقارنة بين تقنيتين للترشيح الضوئي (تقانة ليف براغ وتقانة التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية) من حيث مقدرة كل تقانة على تخفيض كل من العرض الطيفي للمنبع ومستوى الوريقات الجانبية.

يمكن تعريف المرشح بأنه جهاز ذو منفذين، بحيث يختار طولاً موجياً معيناً ويلغي الباقي، ومن الممكن أن يكون له منفذاً ثالثاً في حال أردنا الحصول على الأطوال الموجية المرفوضة. يقوم المجمع بتجميع الإشارات عند أطوال موجية مختلفة على منافذ الدخل ويضعها على منفذ خرج مشترك، أما الموزع فيقوم بالعملية المعاكسة تماماً. يوضح الشكل (6) مرشحاً يختار طولاً موجياً معيناً ويمنع الباقي، أو يمررها إلى المنفذ الثالث.

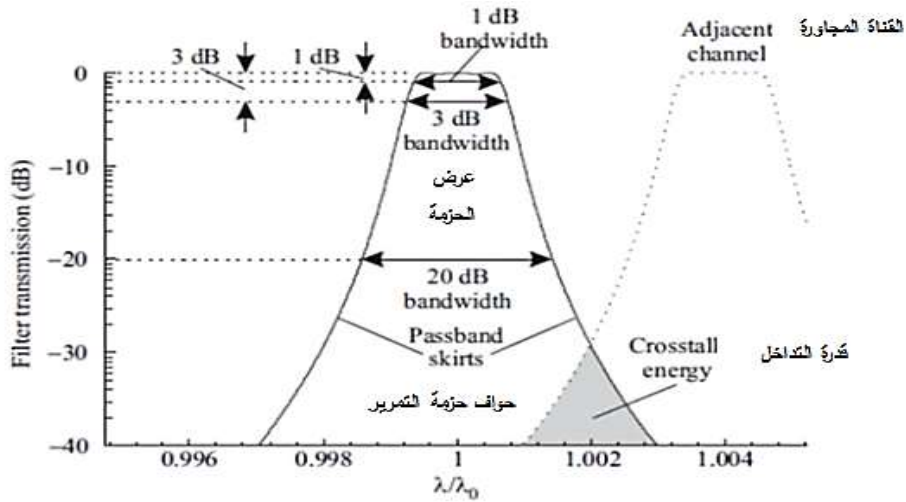


الشكل (6): مرشح يختار طولاً موجياً معيناً ويمنع الباقي، أو يمررها إلى المنفذ الثالث.

أصبحت العديد من تقنيات الترشيح الضوئية متاحة، حيث يجب أن يتوفر في المرشحات الضوئية المواصفات الآتية لتقييم أدائها:

١. يجب أن يكون للمرشحات البصرية الجودة خسارة إدخال صغيرة، وهي الخسارة من الدخل إلى الخرج في المرشح.
٢. يجب أن تكون الخسارة مستقلة عن حالة استقطاب إشارات الدخل. تتغير حالة الاستقطاب بشكل عشوائي مع الزمن في معظم الأنظمة، وإذا كان للمرشح خسارة متعلقة بالاستقطاب، فإن استطاعة الخرج سوف تتغير مع الزمن وهذه السمة غير مرغوبة.
٣. يجب أن يكون مجال التمرير للمرشح غير حساس لدرجة حرارة الوسط المتغيرة.
٤. إن إخماد أو كبت التداخل بين القنوات المتجاورة (Crosstalk Suppression)، أو ما يسمى بعازلية المرشح (Isolation)، الذي يعرف بمثابة طاقة تابعة للقنوات المجاورة، يعدّ بارامتراً مهماً في النظام ويجب ألا تقل قيمته عن -15 dB.

ويبين الشكل (7) مميزة المرشح الضوئي التي تبين علاقة نقل المرشح مقدراً بوحدة dB بطول الموجة النسبي.



الشكل (7): مميزة المرشح الضوئي (λ_0 طول الموجة المركزي للمرشح، λ طول موجة إشارة الضوء).

1-2- تقانات الترشيح الضوئي: Optical Filter Techniques.

تستخدم تقنيتين أساسيتين للترشيح الضوئي في حلقة التغذية العكسية الموجبة لليزر الليفي، هما: تقانة شبكية ليف براغ، وتقانة التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية.

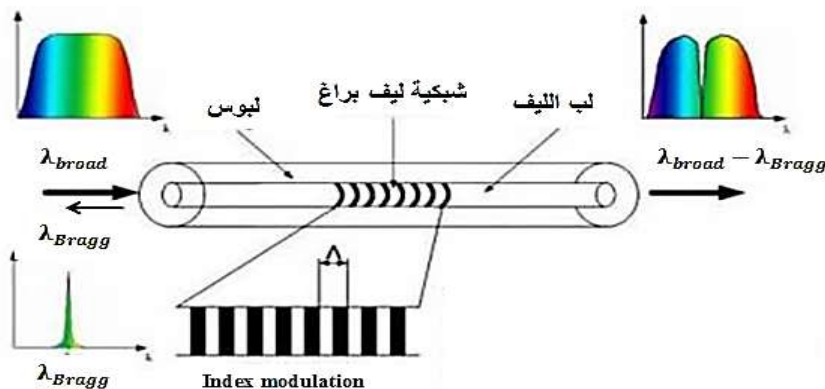
2-1-1- تقانة شبكية ليف براغ: Technique.

• بنية شبكية ليف براغ [17]:

تتوضع عدة شقوق ضيقة بمسافات متساوية في مستوى معين يدعى مستوى أو سطح شبكية ليف براغ، وتدعى المسافة بين شقين متجاورين بخطوة شبكية براغ. يُرسل الضوء الداخل إلى هذا الجانب من شبكية ليف براغ من مصدر معين عبر هذه الشقوق، وبما أن هذه الشقوق ضيقة، حسب نظرية الانكسار، فإن الضوء المار عبر هذه الشقوق ينتشر في كل الاتجاهات، لذلك تلعب هذه الشقوق دور مصدر ثانٍ للضوء.

تستخدم تقانة شبكية ليف براغ بشكل واسع في أنظمة الاتصالات الضوئية، ويمكن تخطيط شبكية براغ على ليف عن طريق توسيع لب الليف إلى حزمتي أشعة فوق بنفسجية متداخلتين، وهذا ما يجعل كثافة الإشعاع تتغير بشكل مترام مع تغيير طول الليف، فعندما تكون الكثافة مرتفعة تزداد قرينة الانكسار وعندما تقل هذه الكثافة فإن قرينة الانكسار لا تتغير.

يمكن استخدام شبكية ليف براغ لصنع مختلف أنواع الأجهزة مثل: المرشحات، ومجمعات إضافة-حذف قناة (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – ROADM)، وعناصر التبديد. يُظهر الشكل (٨) بنية شبكية ليف براغ ومبدأ عمله.



الشكل (٨): بنية شبكية ليف براغ (FBG).

• نظرية شبكية ليف براغ [17]:

تتعرض الموجة المنتشرة خلال شبكية ليف براغ إذا كان طول موجتها مساوياً لطول موجة براغ λ_{Bragg} عند التجاوب، بينما تتابع الموجة مسارها في الحالات الأخرى. تعطى المعادلة التي تربط بين تباعد شبكية ليف براغ وطول موجة براغ عند التجاوب بالعلاقة:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

حيث: n_{eff} قرينة الانكسار الفعالة، و Λ تباعد شبكية ليف براغ.

• الخصائص الأساسية لشبكية ليف براغ:

يعتمد طول موجة تجاوب براغ على تباعد شبكية ليف براغ، وقرينة الانكسار الفعالة. حيث تعتمد قرينة الانكسار الفعالة، لليف على ثابت الانتشار β ، والعدد الموجي في الفراغ $k_0 = 2\pi/\lambda$. يحتاج حساب ثابت الانتشار إلى حل تواضع بيسل، وهو أمر معقد نسبياً لذلك يوجد عبارة تقريبية لقرينة الانكسار الفعالة تعطى بالشكل الآتي [18,19]:

$$n_{eff}^2 = n_2^2 + \frac{\lambda^2}{4\pi^2 a^2} (1.1428V - 0.996)^2 \quad (2)$$

حيث: V تردد الليف المنظم، ويأخذ القيمة $0 < V \leq 2.405$ من أجل الألياف وحيدة النمط. تتعلق قرينة

الانكسار الفعالة بشكل مباشر بكل مما يأتي:

- خصائص الليف.
- قرينة انكسار اللب n_1 .
- قرينة انكسار اللبوس n_2 .
- نصف قطر لب الليف a .

يمكن أن تمثل شبكية ليف براغ من النوع المنتظم في معظم الحالات كتعديل جيبي لقرينة الانكسار $n(z)$ على طول الليف ويعطى بالعلاقة [20]:

$$n(z) = n_1 + \delta n \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right] \quad (3)$$

حيث تمثل n_1 قرينة انكسار اللب، و δn مقدار التغير الأعظمي المسموح به لقرينة الانكسار. يمكن الحصول على خصائص الانعكاسية لشبكية ليف براغ باستخدام الوصف التحليلي لنظرية النمط المترابط، وتتعلق الانعكاسية ببارامترين أساسيين هما طول شبكية ليف براغ L وطول موجة شبكية ليف براغ λ_{Bragg} . ويعطى ثابت الانتشار من أجل طول موجة براغ عند التجاوب بالعلاقة:

$$\beta_B = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_{Bragg}} \quad (4)$$

تصل الانعكاسية إلى ذروتها عند طول موجة براغ، وتعطى بالعلاقة [20-23]:

$$\Phi(L, \lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\gamma_B L)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(\gamma_B L) + \kappa^2 \cosh^2(\gamma_B L)} \quad (5)$$

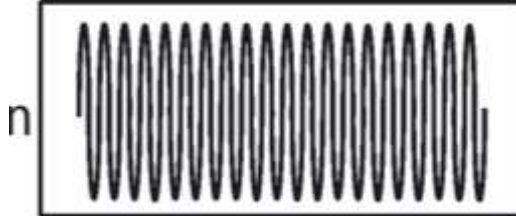
حيث: Φ الإنعكاسية كدالة لطول الشبكة، و λ طول الموجة المطبقة، و $\kappa = \frac{\pi \Delta n_{eff}}{\lambda}$ ، $\Delta\beta = \beta_B - \frac{\pi}{\Lambda}$ ، $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}$.

• أنواع شبكية ليف براغ [24,25]:

يمكن تصنيف أنواع شبكية ليف براغ بحسب تغير قرينة الانكسار إلى:

شبكية ليف براغ المنتظمة (Uniform Fiber Bragg Grating):

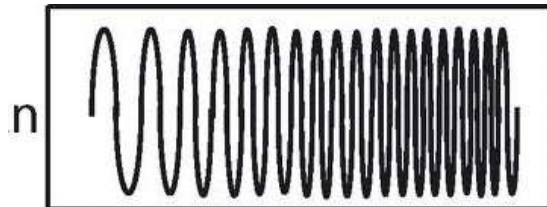
يكون تغير قرينة الانكسار على طول شبكية ليف براغ ثابتاً كما هو مبين في الشكل (٩)، ويسبب هذا النوع من الألياف ظهور وريقات جانبية.



الشكل (٩): بنية شبكية ليف براغ من النوع المنتظم (Uniform).

شبكية ليف براغ من النوع المسقسق (Chirped Fiber Bragg Grating):

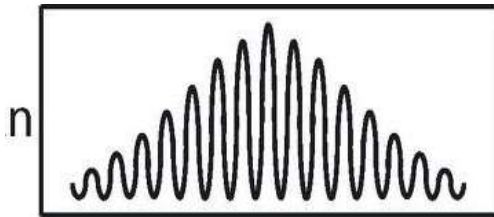
يكون تغير قرينة الانكسار مخفضاً على طول شبكية ليف براغ كما هو مبين في الشكل (١٠)، ويستخدم هذا النوع لزيادة مجال تحقيق الانعكاسية.



الشكل (١٠): بنية شبكية ليف براغ من النوع المسقسق (Chirped).

شبكية ليف براغ متدرج قرينة الانكسار (Apodized Fiber Bragg Grating):

يكون تغير قرينة الانكسار على حواف شبكة ليف براغ صغيراً، بينما يكون كبيراً كما هو مبين في الشكل (١١)، ويستخدم هذا النوع لحذف الوريقات الجانبية.



الشكل (١١): بنية شبكية ليف براغ من النوع ذي قرينة الانكسار المتغيرة تدريجياً (Apodized).

2-1-2- تقانة التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية:

Acousto-Optic Technique.

إن انعراج الضوء من قبل موجة فوق صوتية هي ظاهرة معروفة منذ زمن بعيد. يرجع الفضل إلى العالم الفرنسي برليون، الذي برهن على أنه عندما تنتشر موجة مرنة (موجة فوق صوتية) داخل سائل فإن هذا الأخير يتصرف كشبكة انعراج للضوء. تم تأكيد هذه الأعمال بشكل تجريبي بعد عشرات السنوات من قبل ديبياي وسيرس (Debye & Sears)، وكذلك من قبل ليوكاس وبيكارود (Lucas & Biquard) [25].

فيما بعد، اقترح العالمان ناث ورامان (Nath & Raman)، عبر سلسلة من المقالات العلمية، تعميماً لنظرية العالم برليون. ارتبط اسم العالمين بحالة خاصة للتداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية، وهي الحالة التي تنتشر فيها الأشعة الضوئية في عدة اتجاهات. وضع العالمان باتيا ونوبل (Bhatiaet & Noble)، نظرية تتضمن دراسة التداخل في الحالة العامة (نظام رامان وناث)، وكذلك الحالة الخاصة التي تسمح بتركيز الطاقة في اتجاه واحد فقط، ودعت هذه الحالة بنظام براغ (Bragg) [26,27].

• التفاعل في نظام رامان ونظام براغ:

تعمل الموجة فوق الصوتية عند انتشارها في وسط شفاف (بلوري) على تغيير خصائصه الضوئية، وهذا بدوره يؤدي إلى انعراج الضوء على جبهة الموجة فوق الصوتية عند تحقق شرط محدد من أجل طول موجة ضوئية معين. يشبه المبدأ الفيزيائي لتقانة التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية مبدأ عمل الشبكات الطورية. يمكن التمييز بين نوعين أساسيين لتقانة التداخل فوق صوتي-ضوئي: (a) نظام رامان. (b) نظام براغ.

تنتشر الأمواج الضوئية في النوع الأول بشكل مواز لجبهة الموجة فوق الصوتية، وتتحرف إلى عدة أشعة ضوئية بشكل متناظر على جانبي الشعاع الضوئي الوارد كما في الشكل (a-12). بينما في نظام التداخل من النوع براغ، تتحرف كامل طاقة الموجة الضوئية الواردة في اتجاه محدد كما في الشكل (b-12).



الشكل (١٢): (a) نظام تداخل رامان - ناث، (b) نظام تداخل براغ.

يلعب طول مبدل الأمواج فوق الصوتية دوراً مهماً في تحقيق أحد نوعي التداخل (رامان أو براغ). يحدث التداخل من النوع براغ عندما يكون طول مبدل الأمواج فوق الصوتية في جهة انتشار الموجة الضوئية الواردة بحيث يتحقق قانون حفظ الطاقة.

برهن براغ على أن شدة الشعاع الضوئي المنحرف تكون أعظمية من أجل زاوية ورود θ_B للشعاع الضوئي مقاسة بالنسبة لجهة الموجة فوق الصوتية، وتعطى هذه الزاوية بالعلاقة:

$$\theta_B = \frac{\lambda}{2n\pi} \quad (6)$$

حيث: λ طول الموجة الضوئية الواردة، و π المسافة بين جبهتي موجة فوق صوتية متتاليتين، و n قرينة انكسار الوسط (البلورة).

بخلاف الشبكات الطورية الثابتة (FBG) فإن قيمة تردد الموجة الضوئية المنعكسة (ω_d) ينحرف عن قيمة تردد الموجة الضوئية الواردة (ω_i) بمقدار تردد الموجة فوق الصوتية ($\omega_a = 2\pi\nu_a$)، ويعطى هذا الانزياح في التردد بالعلاقة:

$$\omega_d = \omega_i \mp 2\pi\nu_a \quad (7)$$

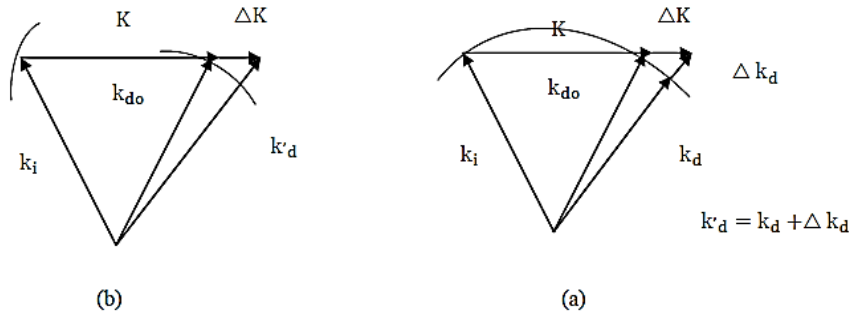
يستخدم هذا الانزياح في التردد في تصميم الماسحات الليزرية، ويعدّ التداخل في نظام براغ مهماً جداً في تصميم المرشحات والمعدلات الضوئية.

• التفاعل في وسط متناظر وغير متناظر:

يمكن تصنيف التداخل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية تبعاً لتبدل استقطاب الموجة الضوئية الواردة (بعد التداخل)، أو عدم تبدله إلى: (a) تداخل متناظر. (b) تداخل غير متناظر.

يحدث التداخل المتناظر عند بقاء الشعاع الضوئي الوارد والمنعرج على نفس منحنى قرينة الانكسار، والعكس صحيح. تتوافق عملية تبديل منحنى قرينة الانكسار بتبديل استقطاب الموجة الضوئية الواردة.

يبين الشكل (a-13) التداخل في وسط متناظر (لا يوجد إلا منحنى قرينة انكسار واحد)، ولذا لا يحدث تغير في استقطاب الموجة الضوئية الواردة، أي أن الموجة الضوئية الواردة والمنعرجة لهما الاستقطاب ذاته. ويبين الشكل (b-13) التداخل في وسط غير متناظر (يوجد منحنيان لقرينة الانكسار)، ولذلك هناك إمكانية لحدوث تداخل متناظر (البقاء على منحنى قرينة الانكسار نفسه بعد التداخل)، أو تداخل غير متناظر (تبديل منحنى قرينة الانكسار بعد التداخل).



الشكل (13): (a) التداخل المتناظر في وسط متناظر، (b) التداخل غير المتناظر في وسط غير متناظر.

تجدر الإشارة إلى أنه في الأوساط متماثلة المناحي (متناظرة) يحدث التداخل المتناظر فقط، بينما في الأوساط غير متماثلة المناحي (غير متناظرة) يمكن تحقيق التداخل المتناظر، وغير المتناظر. من المخطط الشعاعي للتداخل، أنظر الشكل (a-13)، وانطلاقاً من قانون حفظ الطاقة يمكن أن نكتب:

$$\vec{k}_i + \vec{k}_a = \vec{k}_{de} \quad (8)$$

يمثل شعاع الموجة الضوئية الواردة، و \vec{k}_a شعاع الموجة فوق الصوتية، و \vec{k}_{de} شعاع الموجة الضوئية المنحرف في حالة التداخل المتزامن. تتحقق العلاقة (8) تماماً عند تردد محدد للموجة فوق الصوتية والموجة الضوئية الواردة. نلاحظ من المخطط الشعاعي في الشكل (13) أنه إذا تغير شعاع الموجة فوق الصوتية بمقدار $\Delta\vec{k}$ فإن شعاع الموجة الضوئية المنحرف يصبح $\vec{k}'_d = \vec{k}_d + \Delta\vec{k}_d$ ، وتدعى هذه الحالة بحالة التداخل غير المتزامن [عدم تحقق العلاقة (8) تماماً]، مما يؤدي إلى تناقص في شدة الشعاع الضوئي المنحرف، أو انخفاض في مردود التداخل. يعرف مردود التداخل ξ بأنه النسبة بين شدة الشعاع الضوئي المنحرف I_d إلى شدة الشعاع الضوئي الوارد I_i . يتناقص مردود التداخل كتابع للمقدار $\Delta\vec{k}_d$ ، ويكون أعظماً عندما $|\Delta\vec{k}_d| = 0$. وينتج عن المقدار $\Delta\vec{k}_d$ فرق طور $\Delta\varphi$ يعطى بالعلاقة:

$$\Delta\varphi = \Delta k_d \cdot X \quad (9)$$

حيث: X طول مبدل الأمواج فوق الصوتية في اتجاه انتشار الموجة الضوئية. يعطى مردود التداخل ξ بالعلاقة:

$$\xi = \frac{I_d(X)}{I_i(0)} = \frac{P}{P_0} \frac{\sin^2 \sqrt{\frac{P}{P_0} + \left(\frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^2}}{\frac{P}{P_0} + \left(\frac{\Delta\varphi}{\pi}\right)^2} \quad (10)$$

حيث: P استطاعة الموجة فوق الصوتية، و P_0 استطاعة الموجة فوق الصوتية اللازمة للحصول على مردود أعظمي. تعرف P_0 بالعلاقة:

$$P_0 = \frac{\lambda^2}{2M_2} \cdot \frac{X}{Z} \quad (11)$$

حيث: M_2 عامل الاستفادة لوسط التداخل، والذي يستخدم للمقارنة بين أنواع البلورات التي يمكن استخدامها بمثابة وسط تداخل، و Z عرض مبدل الأمواج فوق الصوتية.

٤ - النتائج والمناقشة:

يمكن عملياً التحكم بالعرض الطيفي لليزر الليفي ($\Delta\lambda$)، فهو بارامتر مهم جداً في الاتصالات الضوئية، ويؤثر بشكل مباشر على أداء شبكات الاتصال الضوئي. وكلما قل $\Delta\lambda$ ارتفع معدل نقل البيانات المحملة على طول موجي λ_0 . إضافة لذلك، يجب التحكم بمستوى الوريقات الجانبية لطيف خرج الليزر الليفي، والذي يجب أن يبلغ قيمة أكبر من 10 dB مقارنة بمستوى الوريقة الرئيسية [28].

تركز الأبحاث والدراسات النظرية والعملية على استخدام تقانة ليف براغ وتقانة التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والضوئية ضمن بلورة TeO_2 في حلقة التغذية العكسية لليزر الليفي. يتيح برنامج Optisystem إمكانية محاكاة هذين النوعين من المرشحات، إضافة لذلك يمكن الباحث من اختيار أنواع عديدة منها. أنجز في البحث اختبار على مرشح فوق صوتي-ضوئي وآخر على مرشح ليف براغ مندرج القرينة للمقارنة.

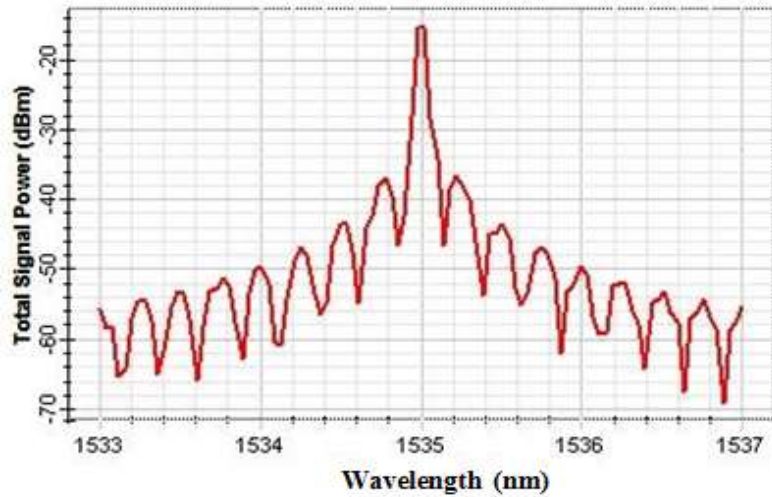
- مرشح ليف براغ: تحوي مكتبة Optisystem نوعين أساسيين لمرشحات ليف براغ هما:
 - ليف براغ المنتظم (Uniform FBG).
 - ليف براغ متدرج قرينة الانكسار (Apodization FBG). حيث يكون تغير قرينة الانكسار عند حواف شبكية ليف براغ صغيراً، ويستخدم بشكل أساسي لحذف الوريقات الجانبية.

يبين الجدول (1) ملخصاً بالإمكانات المختلفة لمحاكاة ليف براغ.

الجدول (1): نماذج FBG المتاحة في مكتبة Optisystem.

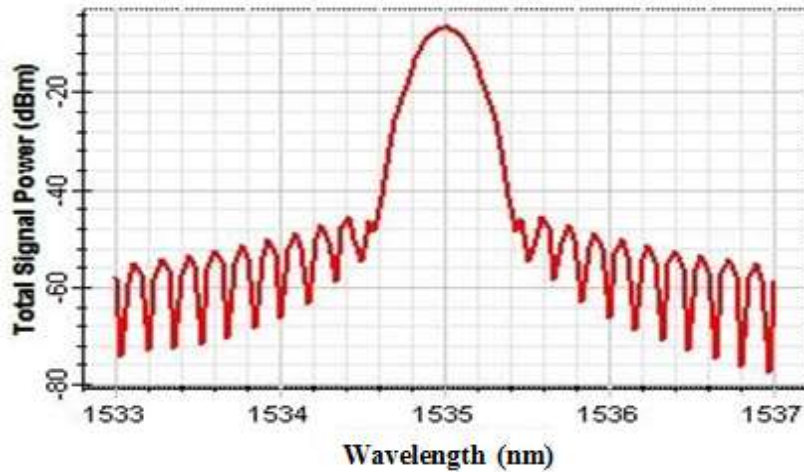
FBG Filters Models (Apodization)	
	IV. User Defined
Chirp	III. Tanh
	II. Gaussian
	I. Uniform
	A. None
	B. Linear
	C. Quadratic
	D. Square root
E. Cubic Root	
F. User Defined	

إضافة للنماذج المختلفة لمرشحات ليف براغ التي ينتجها المحاكى، يمكن تغيير طول ليف براغ وضبط مواصفات المرشح الليفي الصرف حسب الطلب. يبين الشكل (14) نتائج محاكاة ليف براغ المنتظم، حيث تبلغ الانتقائية الطيفية $\Delta\lambda = 0.01 \text{ nm}$ ، وتوهين للوريقة الأولى قدره 21 dB، وللوريقة الثانية 28 dB.

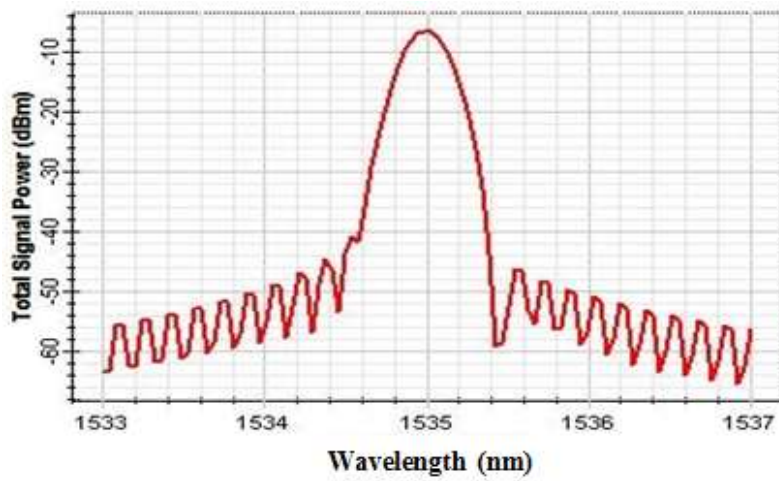


الشكل (14): نتائج محاكاة ليف براغ المنتظم.

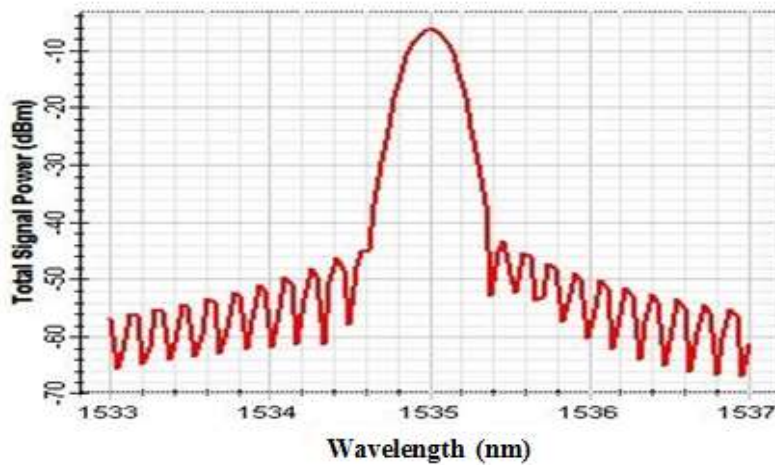
وتبين الأشكال (15)، (16)، (17)، (18) نتائج محاكاة ليف براغ ذو قرينة الانكسار المتغيرة تدريجياً لطول $L = 5 \text{ mm}$ ، ومن أجل أنواع مختلفة لتغير قرينة انكسار لب الليف (Apodization)، وحالات مختلفة لسقسفة الليف (Chirp).



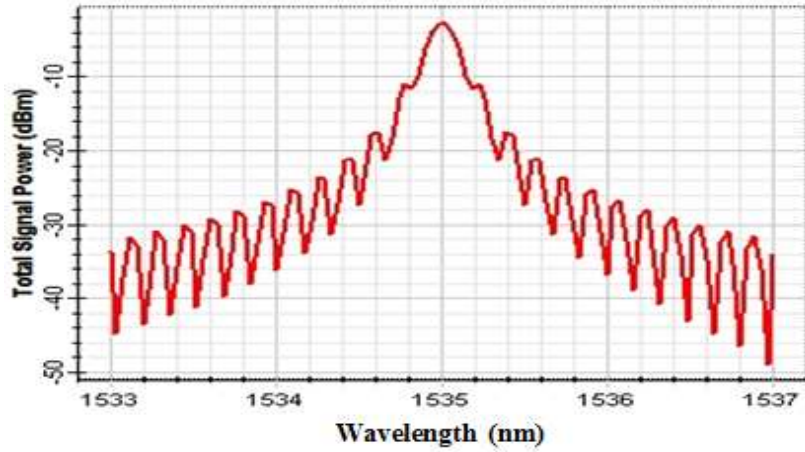
الشكل (١٥): نتائج محاكاة ليف براغ المسسق حالة (II.A).



الشكل (١٦): نتائج محاكاة ليف براغ المسسق حالة (II.C).

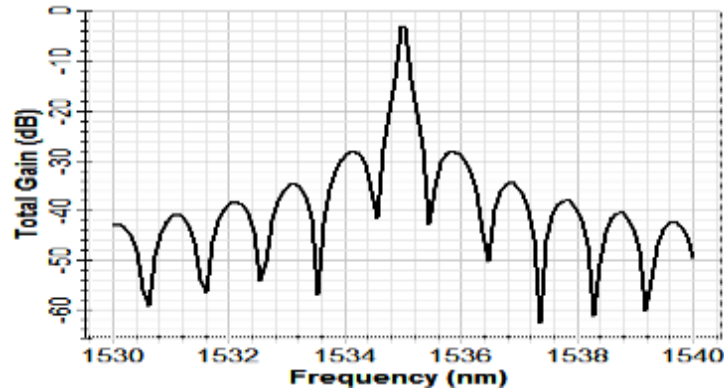


الشكل (١٧): نتائج محاكاة ليف براغ المسسق حالة (II.E).

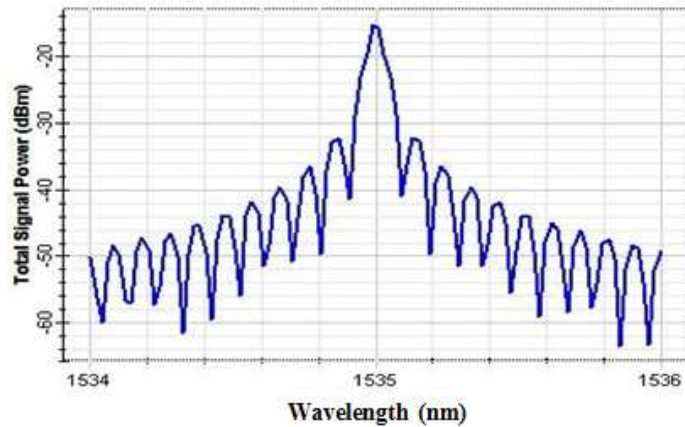


الشكل (١٨): نتائج محاكاة ليف براغ المسقسق حالة (III.A).

بمعاينة منحنيات طيف مرشح ليف براغ نجد أنّ بنية الليف من حيث شكل تغير قرينة انكساره ونوع السقسقة تؤثر على مقدار توهين الوريقات الجانبية بالإضافة إلى تغير ضياع الإدخال للمرشح، والذي يجب أن يؤخذ بالحسبان في عملية تصميم الليزر الليفي، بينما نجد أنّ العرض الطيفي لا يتأثر بشكل ملحوظ. يبين الشكلين (١٩) و(٢٠) نتيجة حالتي اختبار مرشح فوق صوتي-ضوئي.



الشكل (١٩): نتائج محاكاة مرشح فوق صوتي-ضوئي، حالة a.



الشكل (٢٠): نتائج محاكاة مرشح فوق صوتي-ضوئي، حالة b.

يبين الجدول (2) أثر المرشح الضوئي على طيف خرج الليزر عند الطول الموجي 1535 nm.

الجدول (2): أثر المرشح الضوئي الصرف في حلقة التغذية العكسية لليزر الليفي.

	Type of Filtration Technique		
	Acousto – Optic	FBG (Uniform)	FBG (Apodization)
Central Wavelength (nm)	1535 (nm)		
$\Delta\lambda$ (nm)	0.1	0.01	0.1
First Loop Level (dB)	-28	-37	-46
Second Loop Level (dB)	-38.3	-43	-

الاستنتاجات والتوصيات:

• الاستنتاجات:

- نلاحظ من الجدول (٢) مرونة تقانتي ليف براغ والتفاعل بين الأمواج فوق صوتية والليزرية في التحكم ببارامترين أساسيين لليزر الليفي عند استخدامهما في حلقة التغذية العكسية.
- بالتدقيق في الجدول (٢) نجد أنه يمكن الحصول على قيم صغيرة جداً للعرض الطيفي لليزر الليفي تساوي 0.01nm في حالة ليف براغ المنتظم وتتفوق تقانة ليف براغ على تقانة التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والليزرية في قدرتها على تخميد الوريقات الثانوية، حيث بلغت -46 dB لليف براغ المسقسق مقابل -28 dB لتقانة التفاعل بين الأمواج فوق صوتية والليزرية.

• التوصيات:

- يمكن إعادة الدراسة ضمن نوافذ من أجل إشابات مختلفة لوسط الريح الليفي مثل البراسيديمو حيث يمكننا من العمل ضمن نافذة الاتصالات (Original) "O-Band" التي يبلغ امتدادها الطيفي (1260 - 1360) nm. أيضاً، الإشابة بشاردة الثولوم (Thulium) Tm^{+3} يسمح لنا استخدام نافذة الاتصالات "S-Band" (Short) التي يمتد مجالها (1460 - 1530) nm.

- إعادة الدراسة من أجل نوع إشابة محدد من أجل تراكيز إشابة مختلفة.

- إعادة الدراسة من أجل نوع إشابة محدد بتركيز إشابة محدد من أجل أطوال وأقطار مختلفة لوسط الريح.

المراجع:

- [1] Hosam, M; Ashraf, M; And Khalid, H. *Design of multistage FBG with variable filter parameters*. Benha university, Electronics Research Institute. 2023.
- [2] Ghedira, S; And Saad, S. *New Interrogation System for FBG Sensors based on Midband Filter with Correction*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. Vol. 13, N°. 6, 2023, 12092-12096.
- [3] JUNYONG, A; SAONGMIN, P; And WONJU, J. *Enhancement of Acousto-Optic Interaction Using a Phoxonic Cavity with Structural Hierarchy*. (2024) 14:8764. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57816-2>, www.nature.com/scientificreports/
- [4] DUPONT, S; KASTELK, J; VANHAMEL, J; And DEKEMPER, E. *Acousto-Optical Tuneable Filter Design for Efficient Diffraction of Unpolarised Light*. 10th Convention of the European Acoustics Association: EAA. 2023, 4935-4938.
- [5] Europhotonics Course. Aix-Marseille University, 2022
- [6] BENOIT. A, *High Power Hybrid Fiber Laser Sources: Amplification And Frequency Conversion*. Ph.D theses, Limoges University: France. 2015.

- [7] IXBLUE. *Photonics Special Issue*.2022. <https://www.ixblue.com/>.
- [8] IPG PHOTONICS. *The Power To Transform Investor Guidebook*, Sustainability Report. 2022. <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [9] IGP PHOTONICS. *Investor Guidebook*. 2022. <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [10] MIN, JIANG; HANSHUO, WU; YI, AN; TIANYUE, HOU; QI, CHANG; LIANGJIN, HUANG; JUN, LI; RONGTAO, SU; AND PU, ZHOU. *Fiber laser development enabled by machine learning: review and prospect*. Springer: PhotoniX, China, Vol. 3, N°. 16, 2022, 27.
- [11] ALESHKINA, SVETLANA; GUMENYUK, REGINA; and FILATOVA, SERAFIMA. *Specialty Optical Fibers, Fiber Lasers and Their Applications*. MDPI: Photonics, Switzerland: Basel, 2022.
- [12] SHA, WEIJIAN; CHANTELOUP, JEAN; AND MOUROU, GERARD. *Ultrafast Fiber Technologies for Compact Laser Wake Field in Medical Application*. MDPI: Photonics, Switzerland: Basel, 2022.
- [13] OIAN, L. I. *Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. Advanced Labs for Special Topics in Photonics (ECE 1640H), Toronto University, 1998.
- [14] NÚÑEZ. C. HÉCTOR. *All-optical communication system based on orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) and optical time-division multiplexing (OTDM)*. Master Thesis. DTU Fotonik, Lyngby University, Denmark, 2014.
- [15] BRUNO, M.M; *Simulation and Performance Evaluation of OTDM in Optical Communication System*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), India, Vol. 4, N°. 1, 2015, 489-493. www.ijert.org
- [16] KIM, M; KIM, B; CHUNG, Y. *300-Gb/s Transmission Using OTDM System Implemented With Sinusoidally Modulated Input Light Source*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 34, N°. 14, 2022, 745-748. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- [17] HILL, K; MELTZ, G. *Fibre Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview* (Invited Paper). Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, N°. 8, 1997, 1263-1276.
- [18] SENIOR, J. *Optical Fibre Communications: Principles and Practice*. 3rd ed. England: Pearson Education Limited, 2009, 1076.
- [19] AGRAWAL, G. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002, 546.
- [20] UGALE, S; and MISHRA, V. *Fiber Bragg Grating Modeling, Characterization and Optimization with Different Index Profiles*. International Journal of Engineering Science and Technology. Vol. 2, N°. 9, 2010, 4463-4468.
- [21] IKHLEF, A; HEDARA, R; and BLED, M. *Uniform Fiber Bragg Grating Modeling And Simulation Used Matrix Transfer Method*. International Journal of Computer Science Issues. Vol. 9, N°. 2, 2012, 368-374.
- [22] Dong, L; HUA, P; Birks, T; REEKIE, L; and RUSSELL, P. (1996). *Novel Add/Drop Filters for Wavelength Division Multiplexing Optical Fiber Systems Using a Bragg Grating Assisted Mismatched Coupler*. IEEE Photonics: Technology Letters. Vol. 8, N°. 12, 1996, 1656-1658.
- [23] HILL, K; MALO, B; BILODEAU, F; THERIAULT, S; JOHNSON, D; And ALBERT, J. *Variable-Spectral-Response Optical Waveguide Bragg Grating*

Filters for Optical Signal Processing. OSA: Opt. Letters. Vol. 20, N°. 12, 1995, 1438-1440.

[24] GEMZICKY, E; and MULLEROVA, J. *Apodized and Chirped Fibre Bragg Gratings for Optical Communication Systems: Influence of Grating Profile on Spectral Reflectance*. Proc. of SPIE Vol. 7138 71380X-1, 2008.

[25] LECOY, P. *Fiber Optic Communications*. 4th ed. First published in Great Britain and the United States: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2008, 352.

[26] YANG, W; LIU, Y; and YANG, Z. *Wavelength-Tunable Erbium-Doped Fiber Ring Laser Employing an Acousto-Optic Filter*. IEEE: Journal of Lighthwave Technology. Vol. 28, N°. 1, 2010, 118-122.

[27] SMITH, D; MAEDA, M; JOHNSON, J; PATEL, J; SAIFI, M; and LEHMAN, A. *Acoustically Tuned Erbium-Doped Fiber Ring Laser*. Opt. Letters. Vol. 16, N°. 6, 1991, 387-389.

[28] ISSA, H; QUINTARD, V; PERENNOU, A; and SAKKOUR, A. *Double Pass in Acousto-Optic Tunable for Telecommunication Network*. SPIE: Optical Engineering. Vol. 53, N°. 7, 2014, 1-7.