

Multi-wavelength Fiber Laser for Optical Communication Applications

Dr. Afif Sakkour*
Dr. Nazir Dayoub**
Ali Hassan***

(Received 12 / 10 / 2022. Accepted 2 / 1 / 2023)

□ ABSTRACT □

The transportation and localization of technologies is considered a rather important issue, especially the ones that benefits the economy, of which is the development and fabrication of LASER systems of all kinds, the laser devices income has estimated to be 6 million a year, and the optic communication laser has the highest percentage of 31% of the market annual share.

this research aimed to the precise knowledge and understanding of the technology of rare earths doped single-mode optical-fiber lasers as a gain medium by performing an accurate literature review through setting a novel way included in the text below.

Er-doped LUCENT HP980 optical fiber is chosed as a gain medium, and we have reached a gain medium using Optisystem as a simulator, which is used by optics tech companies and research centers across the glope, for the simulator has database includes all the essential optical elements to build an important optical system

hence, this research according to the HP980 simulation results has proposed a laser system that release at constant power (-5dm) at ($\lambda_i=1531.8\text{nm}+3.2i$; $i=0,1,2,3$) for the purpose of optic communications that fulfill the demands and recommendations of ITU-U and Wavelength Division Multiplexing.

Keywords: Erbuim Doped Fiber (EDF) - Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) - Fiber Laser - Wavelength Division Multiplexing (WDM)

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

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

*** Postgraduate Student (PhD)- Department of Physics- Faculty of Sciences- Tishreen University-Lattakia-Syria.

ليزر ليفي متعدد أطوال الموجة لتطبيقات الاتصالات الضوئية

د. عفيف صفور*

د. نظير ديوب**

علي حسن***

(تاريخ الإيداع 12 / 10 / 2022. قُبِلَ للنشر في 2 / 1 / 2023)

□ ملخص □

تعتبر مسألة نقل وتوطين التقانة مسألة هامة جداً خاصة تلك التي تعود بفائدة ومردود اقتصادي مهم، منها تطوير وتصنيع منظومات ليزرية بمختلف أنواعها. فلقد بلغت مبيعات الليزر ستة مليار دولار سنوياً، وتشكل ليزرات الاتصالات الضوئية النسبة الأعلى تجارياً والتي تصل إلى 31% من المبيعات السنوية. سعى البحث إلى الفهم والتمكن الدقيق من تقانة تصنيع ليزرات تستخدم الليف الضوئي أحادي النمط المشاب بعناصر أرضية نادرة كوسط ربح عبر انجاز دراسة مرجعية وتتبع دقيق للأبحاث وصولاً إلى طرح أفكار جديدة مبتكرة مضمنة في متن البحث.

تم اعتماد الليف الضوئي HP980 ، المشاب بالإريوم، من إنتاج شركة LUCENT، كوسط ربح ليفي. فقد حصلنا على خصائص وسط الربح باستخدام المحاكي Optisystem المستخدم من قبل الشركات المصنعة للتقانات الضوئية وكذلك مراكز الأبحاث، حيث يحوي المحاكي مكتبة تضم جميع العناصر الضوئية اللازمة لاختيار منظومة ضوئية مهمة. اقترح البحث، اعتماداً على نتائج محاكاة وسط الربح HP 980، منظومة ليزرية لتحرير استطاعة (-5dBm) ثابتة عند أطوال موجة $(\lambda_i = 1531.8\text{nm} + 3.2i ; i = 0, 1, 2, 3)$ (بحسب متطلبات أنظمة التجميع بتقسيم الطول الموجي Wavelength Division Multiplexing - WDM)، ذلك من أجل تطبيقات الاتصالات الضوئية والتي تحقق متطلبات وتوصيات كلاً من ITU-T وأنظمة التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية (WDM).

الكلمات المفتاحية: ليف مشاب بالإريوم - مضخم ليفي مشاب بالإريوم - ليزر ليفي - التجميع بتقسيم طول الموجة WDM .

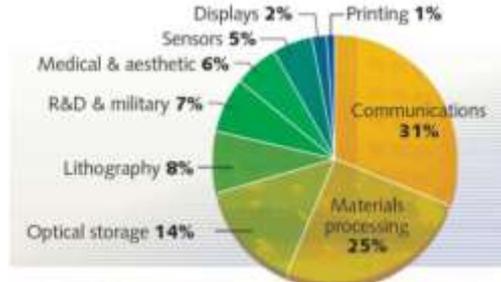
*أستاذ مساعد - قسم الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

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

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

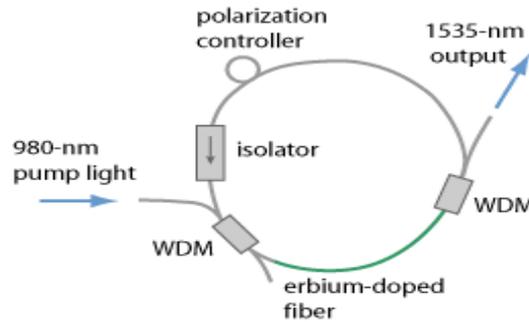
تعتمد الثورة التكنولوجية في مختلف مجالات العلوم على تطور منظومات الليزر بمختلف أنواعه، فقد بلغت مبيعات الليزر ستة مليار دولار سنوياً، وتشكل ليزرات الاتصالات النسبة الأعلى تجارياً، والتي تصل إلى 31% كما هو مبين في الشكل(1).



شكل (1): النسب المئوية التجارية لمختلف أنواع التطبيقات الليزرية.

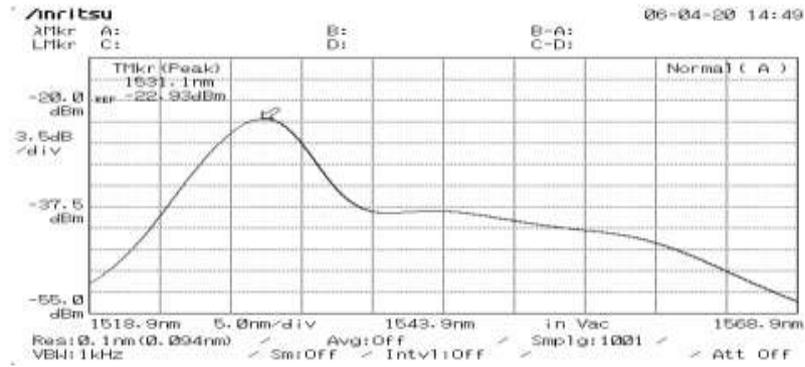
من بين التقنيات المختلفة لتصنيع ليزرات الاتصالات، امتاز الليزر الليفي بمواصفات ومزايا خاصة جعلته محط اهتمام الباحثين، وأدخلته في العديد من التطبيقات العلمية والتكنولوجية. يتميز تصميم الليزر الليفي بعدم حاجته إلى مرآيا، وبأن مكوناته متكاملة ومدمجة، فجعلت منه هذه المواصفات لليزر المفضل في عالم الاتصالات الضوئية ذات السرعات العالية، والحساسات، وفي المطيافية وفي الطب ومعالجة المواد [1-6].

يمكن تصميم المجاوب في ليزرات الألياف الضوئية بأشكال عديدة ولكل شكل مزاياه الخاصة به لا مجال لنا لذكرها والتوسع بها في هذا البحث. يمثل نموذج المجاوب الدائري باتجاه واحد (باستخدام عازل ضوئي) التصميم الأمثل لليزرات الليفية لتطبيقات الاتصالات الضوئية. يتم ذلك باستخدام جامع ليفي لجمع إشارتي الضخ والتغذية العكسية (إشارة الليزر)، ويتم باستخدام قارن ليفي (يعمل كمرآة خرج) الحصول على الحزمة الليزرية كما هو موضح في الشكل (2).



شكل (2): مجاوب دائري لليزر ليفي.

يمكن أيضاً استخدام نموذج الحلقة المفتوحة (Broken Ring) لليزر الليفي بهدف الحصول على منبع ضوئي غير مترابط عريض النطاق (Amplified Spontaneous Emission - ASE) والذي يعرف تقنياً بمنبع الاصدار التلقائي المضخم. يتغير منحنى ASE للحلقة المفتوحة بنفس تغير منحنى ربح المضخم المشاب بعناصر الأثرية النادرة، يبين الشكل (3) نموذج مخبري تم الحصول عليها لمنحنى طيف منبع ASE غير المترابط الناتج عن ليف ضوئي مشاب بالإربيوم (Erbium) [7].



شكل(3): طيف ASE الناتج من ضخ ليف بصري مشاب بالإرييوم (طيف حلقة مفتوحة).

تجدر الإشارة إلى أن منابع ASE تلك تمثل حاجة ضرورية من أجل تطبيقات أنظمة التجميع بتقسيم الزمن الضوئية (Optical Time-Division Multiplexing - OTDM) [8-14]. فهذه التطبيقات تتطلب منابع ضوئية عريضة النطاق، واستطاعة منخفضة تحققها منابع ASE الصادرة عن ضخ ألياف مشابهة بعناصر أثرية نادرة.

أهمية البحث وأهدافه:

تصميم ليزرات متعددة أطوال الموجة الضوئية مخصصة لتطبيقات الاتصالات الضوئية المتوافقة مع متطلبات ومعايير الاتحاد الدولي للاتصالات (International Telecommunication Union - ITU)، وفقاً للتباعد الطيفي بين الحوامل الضوئية والتي تتغير تباعاً لتقنية التجميع بتقسيم طول الموجة المستخدم، ويبين الجدول (1) القيم العددية للتباعد الطيفي بين حامل ضوئي وآخر مجاور حسب معيار ITU.

جدول (1): التباعد الطيفي بين الحوامل الضوئية حسب ITU.

Spacing	Optical channels
1000 GHz ($\Delta\lambda = 8 \text{ nm}$)	4
400 GHz ($\Delta\lambda = 3,2 \text{ nm}$)	8
200 GHz ($\Delta\lambda = 1,6 \text{ nm}$)	16
100 GHz ($\Delta\lambda = 0,8 \text{ nm}$)	32
50 GHz ($\Delta\lambda = 0,4 \text{ nm}$)	80
25 GHz ($\Delta\lambda = 0,2 \text{ nm}$)	160

تعاني الليزرات متعددة أطوال الموجة المصممة لتطبيقات WDM من تغير استطاعة الحامل الضوئي (خرج الليزر الليفي) بتغير طول الموجة الضوئية المولدة، حيث يتطلب الأداء الجيد للشبكة الضوئية استخدام ليزرات مضبوطة بفاصل طيفي محدد واستطاعة خرج ثابتة (مستقل عن طول الموجة الضوئية المولدة).

تظهر مشكلة تغير الاستطاعة مع طول الموجة بشكل واضح عند تصميم الليزرات المعتمدة على وسط ربح ليفي (ليف ضوئي أحادي النمط مشاب بعناصر أرضية نادرة)، وتسعى الأبحاث والدراسات إلى اقتراح طرق لحل هذه المشكلة عبر تقنيات تسطيح الريج للمضخم الليفي [15-18].

يدرس البحث هذه المشكلة وتأتي أهميته في اقتراح حل مبتكر يقدم حلاً وطريقة أسهل للحصول على منظومة ليزرية تحقق متطلبات ITU-T ومتطلبات xWDM.

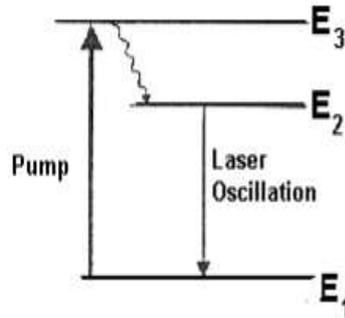
طرائق البحث ومواده:

استخدم البحث ليف ضوئي مشاب باليربيوم (EDFA) كوسط ربح لمنظومة ليزر ليفي قابل للتوليف يخدم تطبيقات الاتصالات الضوئية.

اعتمد البحث على برنامج المحاكاة الشهير Optisystem المستخدم عالمياً في تصميم منظومات المضخمات والليزرات الليفية. حيث تحتوي مكتبة المحاكي على مجموعة كبيرة من العناصر الضوئية التي تتيح مرونة عالية في تصميم وتشكيل المنظومات الضوئية. وبالاعتماد على الخيارات المتاحة ضمن مكتبة المحاكي Optisystem قمنا باستخدام وسط ربح ليفي مشاب باليربيوم كمنبع إشارة أولي لبدء الفعل الليزري، بالإضافة إلى قارن WDM، عازل ضوئي، ومرشح ضوئي قابل للتوليف.

1- وسط الربح الليفي [19]:

يشكل الليف الضوئي المشاب باليربيوم (EDF) العنصر الأكثر أهمية والذي يسمى وسط الربح. حيث تعتبر ظاهرة الاصدار التلقائي المضخم (Amplified Spontaneous Emission-ASE) "التي تنشأ نتيجة لضخ الليف المشاب بالطول الموجي 980nm الموافق لأعلى قمة امتصاص لطيف اليربيوم" أساس توليد الليزر. يبين الشكل (4) سويات الطاقة لليربيوم، حيث يمكن لكل الشوارد الاسترخاء بشكل تلقائي من السوية العليا إلى السوية السفلى بإصدار الفوتونات، يتضخم هذا الفوتون المنبعث تلقائياً بمجرد مروره عبر الليف، ويقوم بدوره على حث إصدار المزيد من الفوتونات من الشوارد المثارة.



الشكل (4): سويات الطاقة لليربيوم.

لدراسة سلوك مثل هذا النظام يجب الوصول إلى معادلات المعدل التي تربط مختلف العمليات التي تحدث (إصدار تلقائي، إصدار محثوث، الضخ) بإسكان السويات، حيث يتم تخفيض النظام ثلاثي السويات إلى ثنائي السويات باعتبار أن سوية الضخ العليا والسوية العليا شبه المستقرة تنتمي إلى نفس السوية. وبالتالي نكتب علاقة المعدل العامة لسوية التضخيم كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sum_k \frac{\sigma_{vk}^a \Gamma_k P_k}{Ah \nu_k} N_1 - \sum_k \frac{\sigma_{vk}^e \Gamma_k P_k}{Ah \nu_k} N_2 - \frac{N_2}{\tau} \quad (1)$$

تصف معادلات الانتشار التفاعلات التي تحدث خلال انتشار الموجة مع الشاردة المتوضعة في المادة المشابهة. الآن وبمعرفة إسكان السويات نستطيع حساب تغير الشدة عبر الليف الضوئي، نكتب العلاقة العامة التي تعبر عن تغير الشدة على طول الليف كما يلي:

$$\frac{dP_k(z)}{dz} = u_k(P_k(z) + m h \nu_k \Delta \nu_k) N_2 \Gamma_k \sigma_{\nu_k}^e - u_k \Gamma_k P_k(z) \sigma_{\nu_k}^a N_1 - u_k \alpha_k P_k(z) \quad (2)$$

2- ليزر ليفي قابل للتوليف:

يتلخص مفهوم الليزر الليفي بوضع الليف الضوئي المشاب بالاربيوم ضمن حلقة الليزر، حيث تتكون كل حلقة ليزر من:

1- ليف ضوئي مشاب بالاربيوم (وسط الريح لليزر الليفي) والذي يعتبر الجزء الأكثر أهمية.

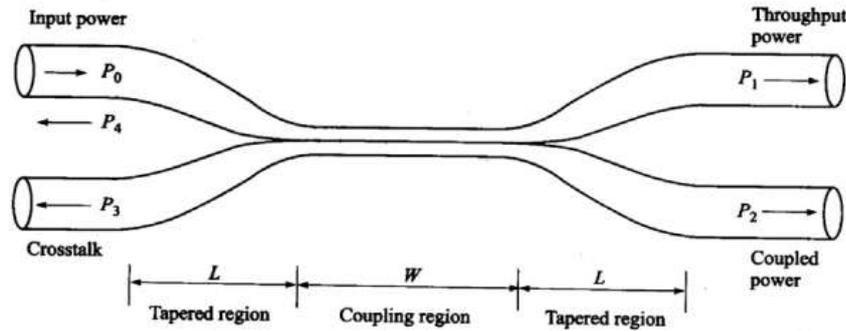
2- (WDM Coupler) لقرن إشارة موجة الضخ وإشارة خرج المضخم الليفي.

3- (Coupler %) قارن نسبي يسمح باختيار جزء من استطاعة خرج المضخم الليفي.

4- مرشح ضوئي قابل للتوليف يسمح باختيار الطول الموجي الرغوب.

3- القارن الضوئي WDM:

تصنع القوارن الضوئية من عملية لحام قلب ليف ضوئي وحيد النمط SMF مع ليف آخر، يشكل القارن الضوئي 2×2 المبين في الشكل (5)، حيث استطاعة إشارة الدخل، P_2 و P_3 تمثلان الاستطاعة عند بوابتي الخرج وفقاً لنسب الانتشار المرغوبة (في الحالة المثالية تكون $P_3=0$) وتسمى البوابة المعزولة، عندئذ يعتبر القارن الضوئي من النوع 2×1.



الشكل (5): قارن ضوئي اتجاها 2×2 ، تشير الأسهم المثبتة على الشكل إلى اتجاه تدفق الاستطاعة المسموح لها.

يتم تصنيع القوارن الضوئية بنسب انتشار قياسية 50/50 أي يتم تقسيم الاستطاعة P_0 في الدخل إلى قيمتين متساويتين عند الخرج. أو يتم تصنيعها بنسب انتشار 90/10 أي يظهر 90% من قيمة P_0 عند البوابة الأعلى استطاعة و 10% عند البوابة الأقل استطاعة.

تجدر الإشارة إلى أن استخدام القارن بالشكل 2×1 (أي بإشارتي دخل وخرج واحد) يدعى بقارن WDM ويستخدم لتجميع طولين موجيين مرغوبين حيث يتوفر بشكل رئيسي في سوق القوارن الضوئية القوارن التالية: 1310/1550 ، 1480/1550 ، 980/1550 .

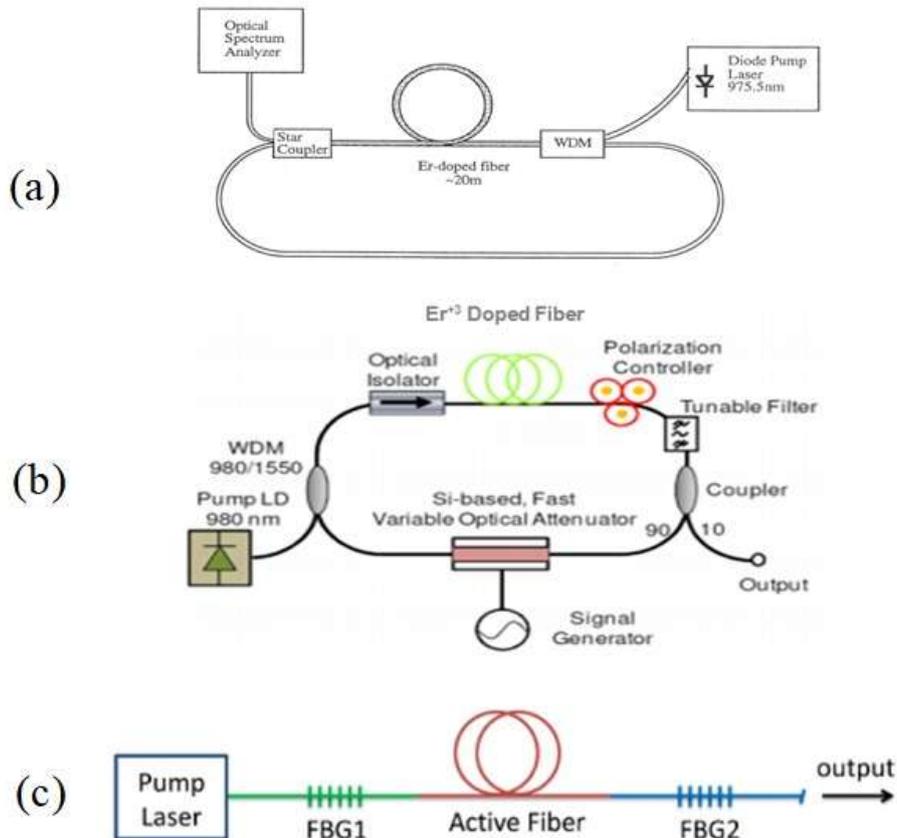
4- المنظومة الليزرية الليفية:

تهدف الأبحاث في مجال الاتصالات التي تستخدم الليف الضوئي المشاب بالاربيوم إلى الحصول على طيف ربح مسطح للحصول على خرج ليزر ليفي ثابت، قمنا في هذا البحث باقتراح تشكيل جديد يستعير عن تسطيح الريح، ذلك باستخدام موهنات ضوئية. اعتمد البحث في تشكيله لهذه المنظومة الليزرية المولفة على ما يلي:

- مجموعة ليزرات ليفية مؤلفة (TDFL) (عدد 4) عند أطوال موجية مرغوبة.
 - مجموعة موهنات ضوئية (موهن واحد لكل ليزر ليفي) بقيم توهين تتوافق مع هدف الحصول على استطاعة خرج ثابتة مرغوبة.
 - (WDM Coupler) لقرن خرج مجموعة الليزرات المستخدمة.
 - اعتمد البحث على استخدام موهنات ضوئية للحصول على استطاعة خرج ثابتة في حالتين للقارن:
 - الحالة الأولى: قارن ضوئي (90/10)، أي تعود 90% من استطاعة دخل القارن إلى حلقة التغذية الراجعة و10% للخروج الليزري.
 - الحالة الثانية: قارن ضوئي (50/50)، أي تعود 50% من استطاعة دخل القارن إلى حلقة التغذية الراجعة و50% للخروج الليزري.
- وتم بعد ذلك تضيق القيم واستخدامها في تشكيل المنظومة الليزرية الليفية بشكلها النهائي، لتحقيق استطاعة خرج ثابتة لمجموعة من الأطوال الموجية.

5- تقانات تشكيل الحلقة الراجعة لليزر ليفي:

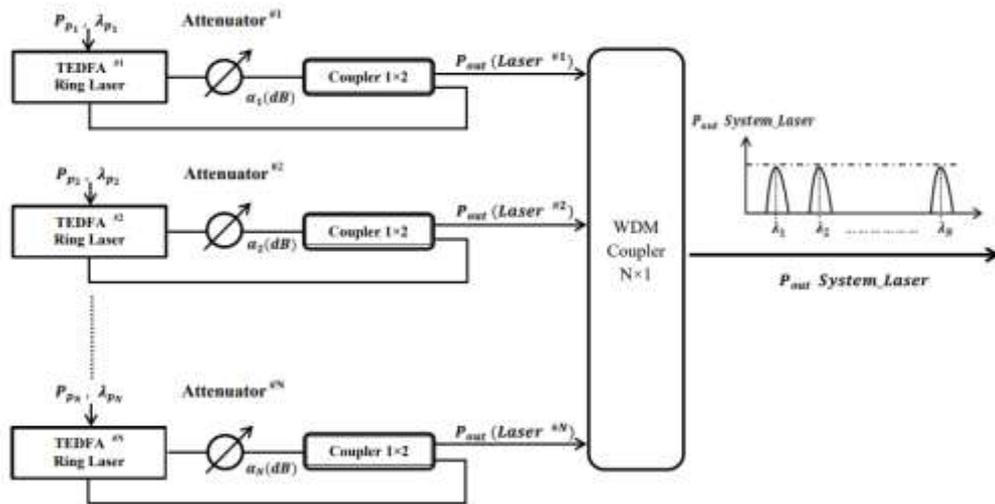
يبين الشكل (6) الحالات الثلاث لتشكيلات الحلقة الراجعة لتضخيم الإصدار التلقائي المحثوث وبالتالي الحصول على الفعل الليزري:



الشكل (6): مختلف تشكيلات الحلقة الراجعة. a- حلقة راجعة تعمل كمضخم طيفي عريض النطاق، b- حلقة راجعة تعمل كليزر ليفي مؤلف تستخدم تقنية موهن ضوئي قابل للتوليف، c- حلقة راجعة تعمل كليزر ليفي تستخدم تقنية شبكية ليف براغ كقارن وكناخب للطول الموجي.

النتائج والمناقشة:

تعتمد الطريقة المقترحة للتغلب على مشكلة تغير استطاعة الليزر الليفي بتغير طول الموجة الضوئية على استخدام عدداً من أوساط الريح الليفية مساوي لعدد أطوال الموجة الضوئية المطلوب توليدها بهدف الحصول على ليزر ليفي متعدد أطوال الموجة. يبين الشكل (7) مخططاً صندوقياً لتصميم منظومة الليزر التي تحقق متطلبات ITU-T من حيث التباعد الطيفي بين الحوامل الليزرية المولدة ومتطلبات WDM من حيث استطاعة خرج المنظومة الليزرية (المتساوي من أجل جميع الحوامل الضوئية المولدة).

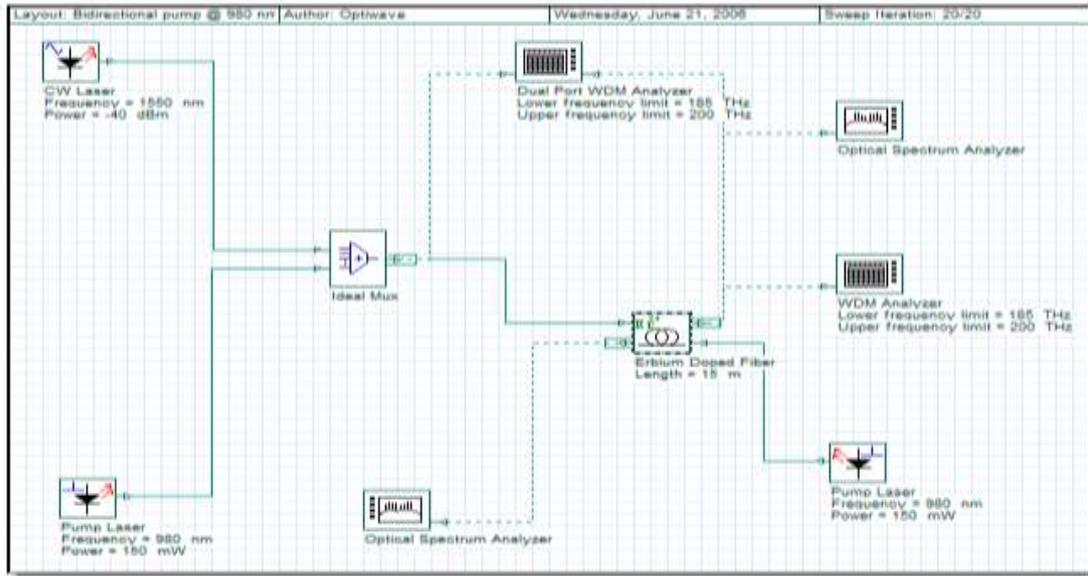


الشكل (7): التصميم المقترح لمنظومة ليزرية تحقق متطلبات ITU-T و WDM معاً.

تتألف المنظومة المقترحة من عدد من الحلقات الليزرية التي تحوي مضخم ليفي مشاب بالإربيوم قابل للتوليف (Tunable Erbium Doped Fiber Amplifier - TEDFA) يليها موهن إشارة ضوئية بمقدار $\alpha_i (dB)$ حيث يدل (i) على رقم الحلقة في المنظومة الليزرية، ثم قارن ضوئي (1×2). ويتم تجميع إشارات (حوامل) الحلقات الليزرية بواسطة مجمع ($N \times 1$). أنجزت الدراسة على منظومة تحتوي على أربعة من TEDFA وتم حساب $\alpha_i (dB)$ بعد تحليل ومحاكاة وسط الريح الليفي TEDFA.

1- دراسة خصائص وسط الريح TEDFA:

تم اعتماد الليف الضوئي HP 980، المشاب بالعنصر الأرضي النادر الإربيوم، كوسط ربح ليفي متوفر تجارياً من إنتاج شركة التقنيات Lucent [20]. يبين الشكل (8) الدارة الضوئية لمحاكاة TEDFA الذي يستخدم كوسط ربح ليزري.



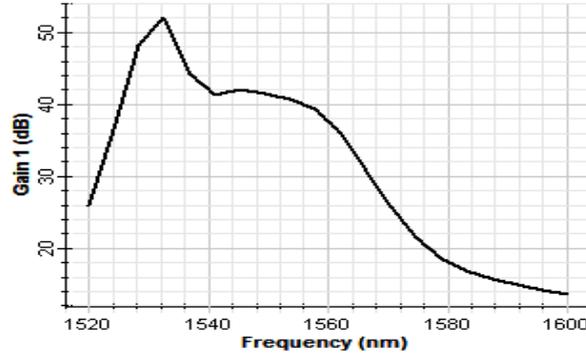
شكل (8): الدارة الضوئية لمحاكاة TEDFA المبني على وسط ربح متوفر تجارياً.

يتألف نموذج تجربة محاكاة وسط الريح الليفي (TEDFA) بالمواصفات المبينة في الجدول (2)، حيث تم ضخّه بمنبع ضخ بالطول الموجي 980nm من الجهتين بهدف الحصول على ربح أعلى للمضخم مما يتيح تحكّم ومرونة أفضل بقيم استطاعة خرج وسط الريح عند استخدامه في الحلقة المغلقة، أي استخدامه كمنبع ليزري. تشكل أجهزة القياس المخبرية المتاحة في البرنامج مثل WDM Analyzer و Dual Port WDM الأداة الفعالة في تحصيل معطيات المحاكاة وبالتالي إمكانية الحصول على منحنيات توصف أداء وسط الريح.

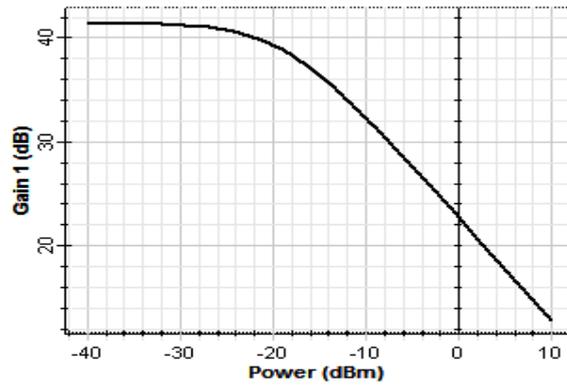
جدول(2): المواصفات الفنية لوسط الريح TEDFA.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	15	m	Normal
<input type="checkbox"/>	Er metastable lifetime	10	ms	Normal
<input type="checkbox"/>	Input data	Fiber specification		
<input type="checkbox"/>	Saturation parameter	4.4e+015	1/(s.m)	Normal
<input type="checkbox"/>	Core radius	1.8	um	Normal
<input type="checkbox"/>	Er doping radius	1.3	um	Normal
<input type="checkbox"/>	Er ion density	1e+025	m^-3	Normal
<input type="checkbox"/>	Numerical aperture	0.2		Normal

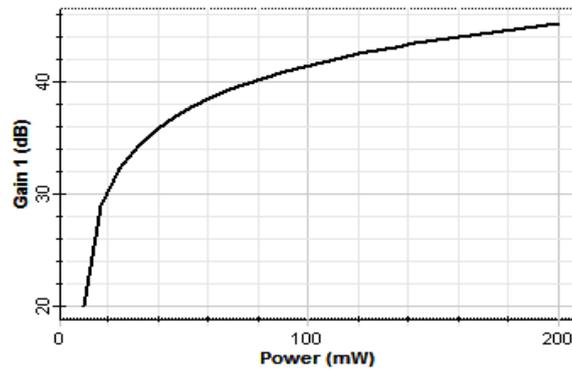
تحتاج عملية التصميم التوصل إلى المنحنيات المذكورة أدناه وتحليل النتائج بدقة للتوصل إلى إنتاج منظومة ليزيرية بتباعد طيفي وخرج مضبوطين تماماً حسب الطلب.
 تبين الأشكال (9 و 10 و 11) ربح وسط الريح الليفي G بتابعية طول الموجة (λ) واستطاعة إشارة الدخل (P_s) واستطاعة الضخ (P_p) على التوالي:



الشكل (9): ربح الوسط الليفي بتابعية طول الموجة $G(\lambda)$.

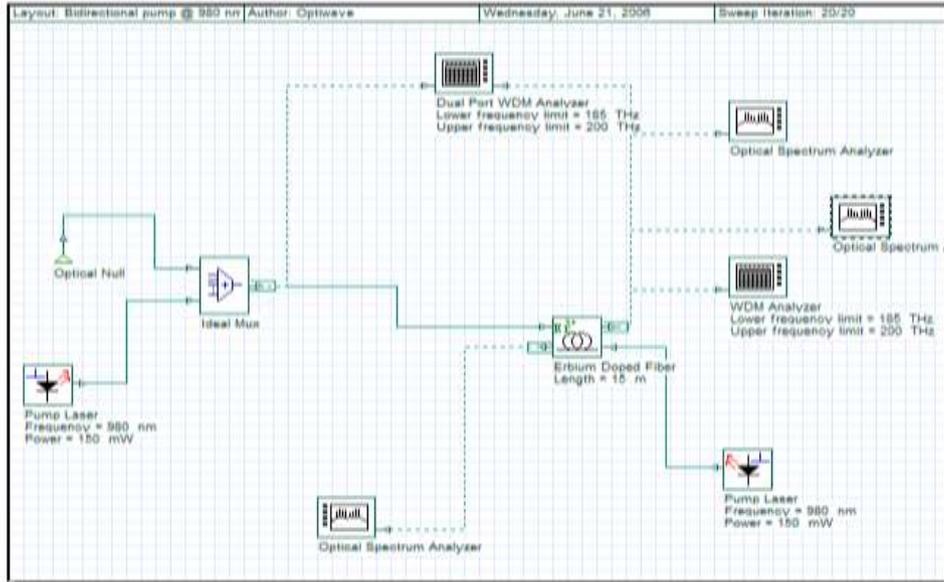


شكل (10): ربح الوسط الليفي بتابعية استطاعة إشارة الدخل $G(P_s)$.



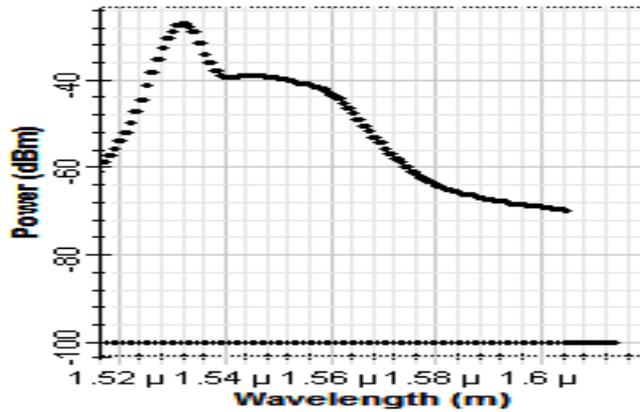
شكل (11): ربح الوسط الليفي بتابعية استطاعة الضخ $G(P_p)$.

يمكن التوصل إلى استطاعة التضخيم التلقائي بتابعية طول الموجة ($P_{ASE}(\lambda)$) بمحاكاة النموذج المبين في الشكل (12).



الشكل (12): الدارة الضوئية لمحاكاة طيف ASE للليف المستخدم كوسط ربح ليزري.

وبيين الشكل (13) نتائج المحاكاة (طيف ASE الناتج):



الشكل (13): استطاعة التضخيم التلقائي بتابعة طول الموجة $P_{ASE}(\lambda)$.

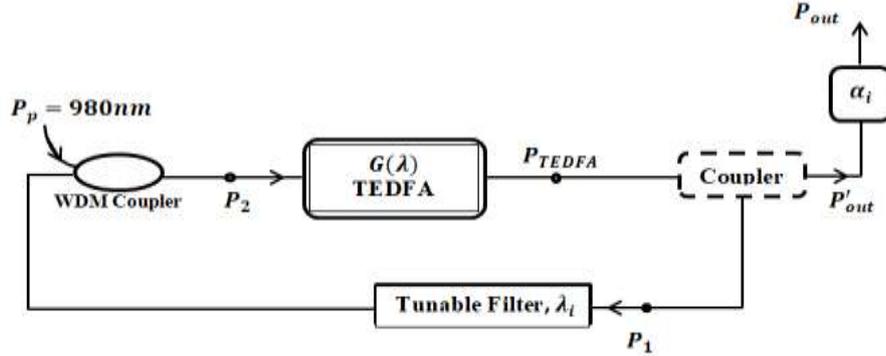
• تحليل نتائج محاكاة وسط الربح TEDFA.

بتحليل نتائج المنحني $P_{ASE}(\lambda)$ واعتبار مستوى مرجعي للمقارنة ($-40dBm$) نجد أنّ الفرق بين أعلى قيمه لاستطاعة P_{ASE} بلغت ($-10dBm$) عند طول موجة $1531 nm$ والمستوى المرجعي يساوي حوالي $3dB$ و يبلغ عرض الحزمة المتاحة ($\Delta\lambda = 1570 - 1538 = 32 nm$) والتي يمكن الاستفادة منها في توليد الحوامل الضوئية حسب متطلبات ITU-T.

قما بمطابقة النتائج العددية لمحاكاة وسط الربح TEDFA مع القيم العددية المنشورة لأبحاث نظرية ومخبرية [21-23]، ووجدنا تطابق جيد للقيم مما يؤكد على صلاحية استخدام وسط الربح المدروس TEDFA في تصميم ليزر ليفي متعدد أطوال الموجة الضوئية لتطبيقات التجميع بتقسيم طول الموجة.

2- دراسة وتحليل خرج حلقة الليزر الليفي TDFL:

أنجزت الدراسة على منظومة ليزرية قابلة للتوليف (Tunable Doped Fiber Laser - TDFL) مكونة من أربع أوساط ربح TEDFA وتحسب قيمة α_i (dB) لكل مرحلة بالاستعانة بنتائج محاكاة الوسط $G(\lambda)$ و $P_{ASE}(\lambda)$ ويوضح المخطط الصندوقي أدناه، الشكل (14)، تفاصيل استنتاج العلاقات الرياضية، وبالتالي القيم العددية.



شكل (14): حلقة الليزر الليفي TDFL.

يمكن من المخطط الصندوقي لحلقة الليزر الليفي TDFL ما يلي:

$$P_{TEDF}(dBm) = P_2 + G(dBm) \quad (3)$$

$$P'_{out}(dBm) = P_{TEDF}(dBm) - \alpha(dB) \quad (4)$$

حيث تمثل α (dB) قيمة الخسارة التي تتعلق بنسبة انشطار القارن البصري (α/β) . حيث تبلغ القيمة $\alpha = 10dB$ من أجل قارن 90% و $\alpha = 3dB$ من أجل قارن 50%. حيث β (dB) وتبلغ القيمة $\beta = 1dB$ من أجل قارن 90% و $\beta = 3dB$ من أجل قارن 50%.

يتعلق الخرج الليزري بنوع القارن المستخدم وسوف ندرس خرج المنظومة الليزرية متعددة أطوال الموجة في حالتين للقارن:

- استخدام قارن 90/10.

- استخدام قارن 50/50.

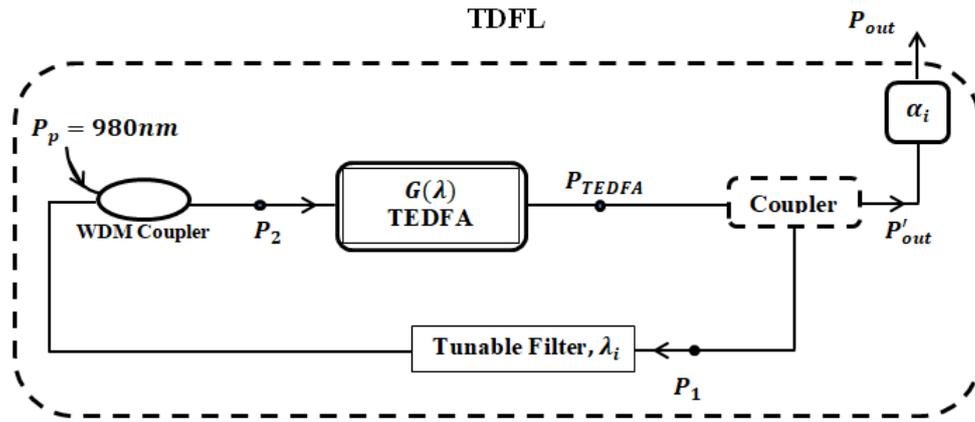
تبلغ القيم العددية للضياعات في العناصر الضوئية لحلقة التغذية العكسية الموجبة لليزر الليفي TEDF بشكل تقريبي ما يلي [24]:

- قارن WDM: 1 dB

- عازل ضوئي: 1 dB

- مرشح ضوئي قابل للتوليف: 3 dB

باعتقاد القيم المرجعية لضياعات العناصر البصرية المذكورة أعلاه، وبالإستفادة من العلاقاتين (3 و 4) يمكن، بشكل دقيق، الحصول على منحنى الخرج الناتج عن الليزر الليفي TDFL. يبين الشكل (15) منظومة TDFL تستخدم قارن 90/10.



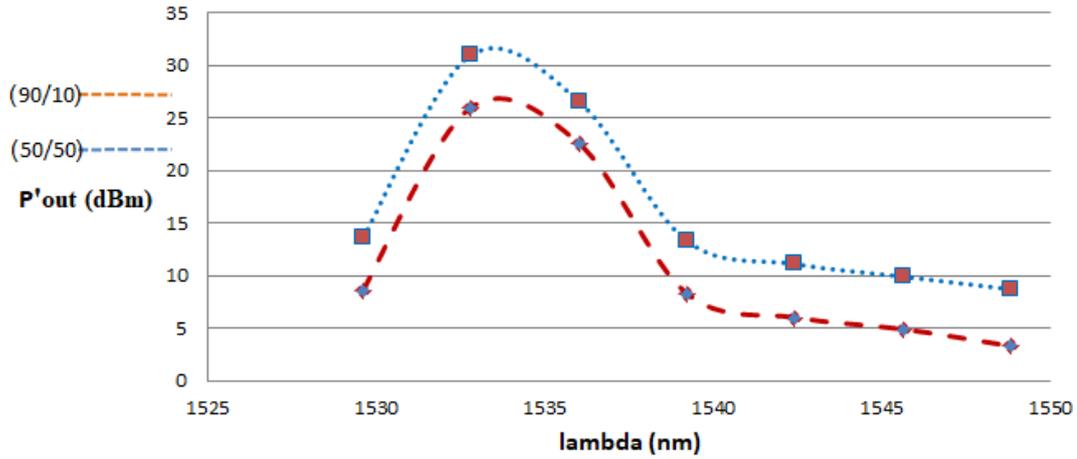
الشكل (15): منظومة TDFL تستخدم قارن 90/10.

يبين الجدول (3) نتائج الحسابات العددية لقيم خرج الليزر الليفي (حيث تبلغ قيمة الضياعات الكلية للحلقة 5dB) باستخدام قارن 90/10 وبتباعد طيفي $\Delta\lambda = 3.2\text{ nm}$.

الجدول (3): الحسابات العددية لاستطاعة خرج الليزر الليفي من أجل تباعد طيفي $\Delta\lambda = 3.2\text{ nm}$ باستخدام قارن 90/10 حسب متطلبات ITU-T.

λ (nm)	P_{ASE} (dBm)	$G(\lambda)$ (dB)	P_{TEDFA} (dBm)	P'_{out} (dBm)
1520	-40	26	-19	-29
1523.2	-37.2	34	-8.2	-18.2
1526.4	-30	39.6	4.6	-5.4
1529.6	-24.4	48	18.6	8.6
1532.8	-9.6	50.6	36	26
1536	-11	47.6	31.6	22.6
1539.2	-20	43.3	18.3	8.3
1542.4	-20.2	41.3	16.1	6
1545.6	-22	41.9	14.9	4.9
1548.8	-23	41.7	13.7	3.3

ويبين الشكل (16) منحني خرج الليزر الليفي من أجل حالتي القارن (90/10 و 50/50).



الشكل (16): منحنى خرج الليزر الليفي من أجل حالتي القارن (50/50 و 90/10).

يعتمد حساب قيم α_i (التوهين للعنصر الضوئي) الذي يجب تركيبه على خرج الليزر الليفي TDFL بعد القارن الضوئي على الجدول (4)، وعلى نوعية القارن المستخدم (نسبة الانشطار).

تعطى العلاقة بين خرج الليزر الليفي $P'_{out}(dBm)$ والخرج $P_{out}(dBm)$ بعد توهينه بمقدار $\alpha_i(dB)$ بالعلاقة:

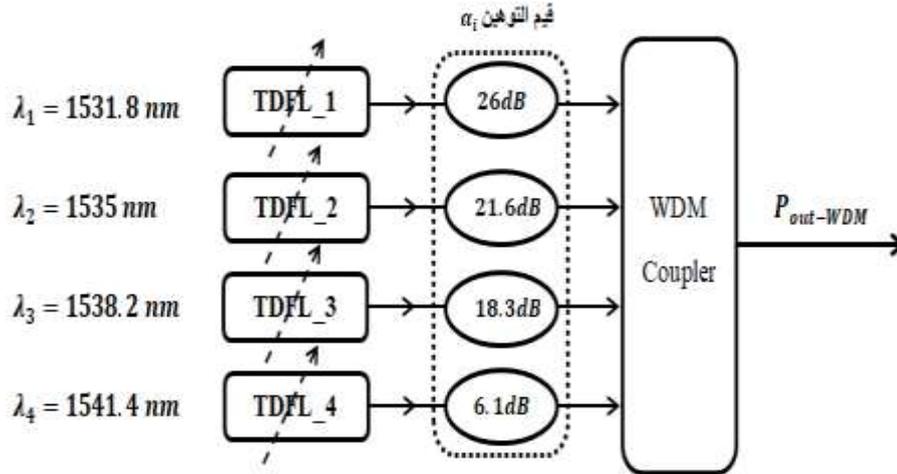
$$\alpha_i(dB) = P_{out}(dBm) - P'_{out}(dBm) \quad (5)$$

يبين الجدول (4) قيم α_i للحصول على استطاعة خرج ليزر ليفي ثابتة ($P_{out} = -5dBm$) وهي قيمة معيارية مسوقة تجارياً لليزرات الاتصالات الضوئية.

الجدول(4): قيم α_i من أجل استطاعة خرج ($P_{out} = -5dBm$) من أجل تباعد طيفي $\Delta\lambda = 3.2 nm$ باستخدام قارن 90/10.

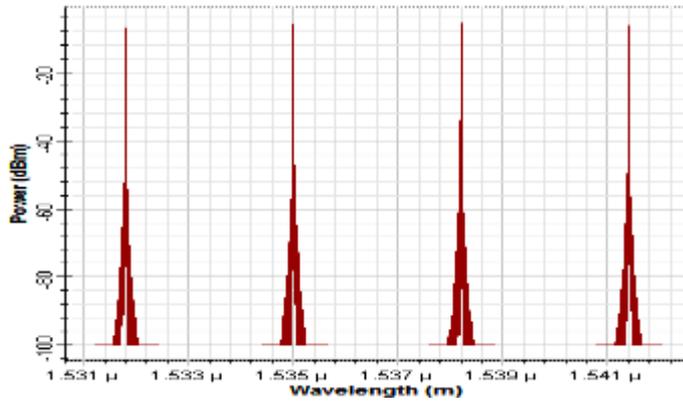
$\lambda (nm)$	$P'_{out}(dBm)$	$P_{out}(dBm)$	$\alpha_i(dB)$
1531.8	26	-5	21
1535	22.6	-5	16
1538.2	8.3	-5	3.3
1541.4	6	-5	1

يوضح الشكل (17) المنظومة الليزرية الليفية متعددة أطوال الموجة وقيم التوهين $\alpha_i(dB)$ الموافقة باستخدام قارن 90/10.



الشكل (17): ليزر ليفي متعدد الأطوال الموجية لتطبيقات WDM باستخدام قارن 90/10.

يوضح الشكل (18) نتائج المحاكاة على برنامج Optisystem لخرج المنظومة الليزرية المقترحة.

الشكل (18): خرج الليزر الليفي متعدد أطوال الموجة. باستطاعة خرج ثابتة (-5dBm) بتباعد طيفي $\Delta\lambda = 3.2 \text{ nm}$.

ويبين الجدول (5) الحسابات العددية في حالة استخدام قارن 50/50 (حيث تبلغ ضياعات الحلقة الكلية 7dB)

باستخدام قارن 50/50 وبتباعد طيفي معياري $\Delta\lambda = 3.2 \text{ nm}$.

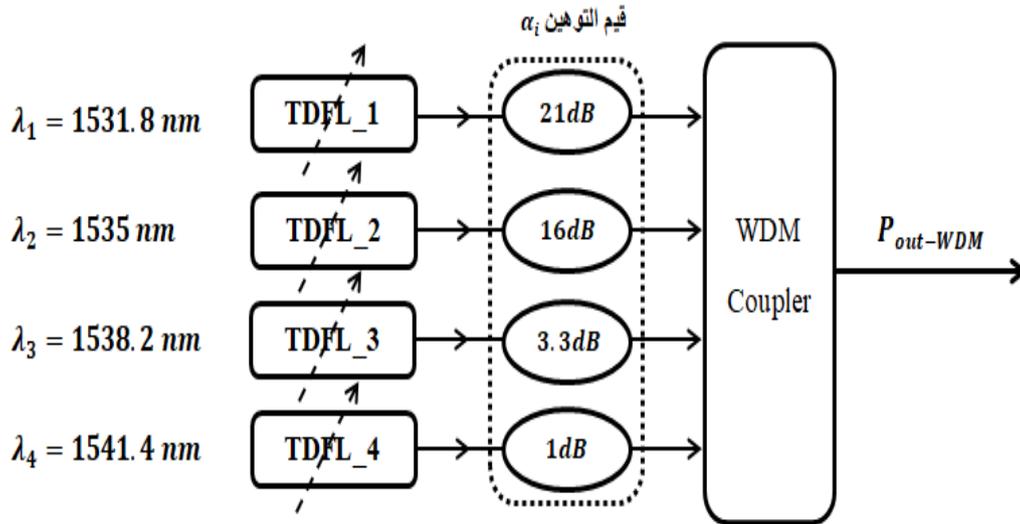
الجدول (5): الحسابات العددية لاستطاعة خرج الليزر الليفي من أجل تباعد طيفي $\Delta\lambda = 3.2 \text{ nm}$ باستخدام قارن 50/50 حسب

متطلبات ITU-T.

$\lambda \text{ (nm)}$	$P_{ASE} \text{ (dBm)}$	$G(\lambda) \text{ (dB)}$	$P_{TEDFA} \text{ (dBm)}$	$P'_{out} \text{ (dBm)}$
1520	-40	26	-21	-18
1523.2	-37.2	34	-10.2	-7.2
1526.4	-30	39.6	2.6	-0.4
1529.6	-24.4	48	16.6	13.6
1532.8	-9.6	50.6	34	31
1536	-11	47.6	29.6	26.6
1539.2	-20	43.3	16.3	13.3
1542.4	-20.2	41.3	14.1	11.1

1545.6	-22	41.9	12.9	9.9
1548.8	-23	41.7	11.7	8.7

يوضح الشكل (19) المنظومة الليزرية الليفية متعددة أطوال الموجة وقيم التخميد $\alpha_i (dB)$ الموافقة في حالة استخدام قارن 50/50 واستطاعة خرج (-5dBm).



الشكل (19): ليزر ليفي متعدد الأطوال الموجية لتطبيقات WDM باستخدام قارن 50/50.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تمكن البحث من خلال تعقب دقيق للدراسات المرجعية (في مجال أبحاث الليزر الليفية على مستوى الدراسات الأدبية والقياسات المخبرية لأهم مراكز الأبحاث) من فهم جيد لتقانة وتكنولوجيا تصميم وتصنيع الليزر الليفية. صمم البحث ليزر ليفي متعدد أطوال الموجة لتطبيقات الاتصالات الضوئية بحيث تحقق متطلبات ITU-T و WDM معاً. اقترح البحث فكرة مبتكرة للحصول على استطاعة خرج منظومة ليزرية ثابتة ومستقلة عن طول الموجة الضوئية العاملة (متطلبات WDM) بدلاً من استخدام تقانات تسطيح الريح لوسط ربح ليفي مشاب معتمد في المنشورات العلمية، وتتمثل الفكرة في اقتراح استخدام عناصر ضوئية بسيطة التصميم والتصنيع (موهات ضوئية). قدم البحث منظومة ليزرية بأربع أطوال موجة ضوئية (دراسة حالة) حيث تم مطابقة نتائج التصميم مع منشورات علمية متعددة. جاءت نتائج البحث ضمن مجالات القيم المنشورة عالمياً على المستوى النظري والعملي على حد سواء. يمكن تلخيص الإضافات التي قدمها البحث مقارنة مع غيرها بالنقاط التالية:

- حدد البحث بوضوح خطوات (بروتوكول) لتصميم ليزر ليفي بمواصفات مطلوبة ومحددة لتطبيقات الاتصالات الضوئية تحقق متطلبات ITU-T و WDM معاً.
- استنبط البحث العلاقات الأساسية للتصميم والتي لم تنشر في أبحاث سابقة وبرهن على صحة استخدامها عبر مقارنة ومطابقة النتائج مع دراسة تجريبية ونظرية لتصنيع الليزر الليفي، وجاءت نتائج الدراسة ضمن مجال القيم

المنشورة لأبحاث سابقة تستخدم وسط ربح ليفي مشاب بالإريوم بمواصفات تقريبية لوسط الربح المستخدم في الدراسة (HP 980) من إنتاج شركة Luceu.

• يمكن تعميم الدراسة (بروتوكول التصميم) للحصول على منظومات ليزرية ليفية تحددها أي جهة لتطبيقات الاتصالات الضوئية.

• تم التوصل في هذا البحث إلى عدة استنتاجات أساسية يمكن إيجازها بما يلي:

✓ نلاحظ من منحنى استطاعة خرج الليزر الليفي، الشكل (16)، أنه يمكن تحرير استطاعات عالية تصل إلى (32dBm) لوسط الربح المستخدم. في الحقيقة، نحتاج إلى استطاعات عالية في حالة تطبيقات السوليتون (اتصالات

المسافات البعيدة فائقة السرعة عبر الليف الضوئي وحيد النمط)، أو من أجل تطبيقات ضوئية أخرى.

✓ تلعب نوعية القارن (نسبة انشطاره) دوراً مهماً في تحديد الاستطاعة التي يتم تحريرها من وسط الربح و يبلغ الفارق في الاستطاعة بين استخدام قارن 90/10 و 50/50 حوالي 5dBm.

✓ مرونة التصميم وامكانية التحكم بمواصفات خرج الليزر الليفي عن طريق ضبط وتغيير قيم الليف المشاب واستطاعة الضخ.

✓ يلعب طول موجة الضخ دوراً بالغ الأهمية حيث يجب ضبطه تماماً على $P_p = 980 \text{ nm}$.

✓ تلعب المرشحات الضوئية الصرفة دوراً مهماً في تحديد شكل طيف الخرج وعرض الحزمة لليزر الليفي حيث تملك كل تقنية ترشيح تابع نقل خاص بها.

✓ الحصول على أطوال موجية أعلى أو أقل من الطول الموجي المدروس (حسب الطلب)، يمكن أن يتم ذلك بسهولة بتغيير نوع إشابة وسط الليزر (الليف الضوئي).

✓ قيمة استطاعة خرج الليزر المصمم $P_{out} = -5 \text{ dBm}$ وهي قيمة مسوقة تجارياً لتطبيقات الاتصالات الضوئية ولذلك استند البحث واختار هذه القيمة.

✓ بلغ مردود الليزر 63% عند طول ليف $L = 20 \text{ m}$.

التوصيات:

يمكن اقتراح عدة توصيات للعمل عليها، ويمكن لكل منها أن يشكل محور بحثي مستقل ومنها:

• دراسة تصميم ليزر ليفي عبر استخدام الطريقة الثالثة المذكورة في أدبيات تقانات تشكيل الحلقة الراجعة والتي تستخدم ليف شبكية براغ بدلاً من القوارن الضوئية، حيث يعتبر هذا النموذج جذاب جداً للدراسة.

• دراسة أثر ونوع المرشحات الضوئية الصرفة المستخدمة في تصنيع الليزر الليفي ومن أهمها تقنية ليف براغ وتقنية التفاعل بين الأمواج فوق الصوتية والليزرية باستخدام بلورات TeO_2 .

• يمكن إعادة الدراسة بالكامل بتطبيق نفس البروتوكول على وسط ربح ليفي مشاب بالثوليوم (Thulium) لتحرير استطاعات ليزرية عند أطوال موجية حول $2 \mu\text{m}$ كنافذة جديدة محتملة للاتصالات عبر الاليف الفوتونية المجوفة.

References:

- [1] IXBLUE. *Photonics Special Issue*.2022. <https://www.ixblue.com/>.
- [2] IPG PHOTONICS. *The Power To Transform Investor Guidebook*, Sustainability Report. 2022. <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [3] IGP PHOTONICS. *Investor Guidebook*. 2022. <https://www.ipgphotonics.com/en>
- [4] 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.
- [5] ALESHKINA, SVETLANA; GUMENYUK, REGINA; and FILATOVA, SERAFIMA. *Specialty Optical Fibers, Fiber Lasers and Their Applications*. MDPI: Photonics, Switzerland: Basel, 2022.
- [6] SHA, WEIJIAN; CHANTELOUP, JEAN; AND MOUROU, GERARD. *Ultrafast Fiber Technologies for Compact Laser Wake Field in Medical Application*. MDPI: Photonics, Switzerland: Basel, 2022.
- [7] OIAN, L. I. *Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. Advanced Labs for Special Topics in Photonics (ECE 1640H), Toronto University, 1998.
- [8] 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.
- [9] HAKANI, R. *Optical Time Division Multiplexing (OTDM)*. (Seminar Report). Institute of Technology, Nirma University, India, 2013.
- [10] 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
- [11] ANSARI, M; ASHOK, A; JAISWAL, A; MAISH, A. *Design and Survey of Optical Time Division Multiplexing for Very High Bit-Rate Transmission*. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), India, Vol. 5, N°. 8, 2016, 544-547. DOI 10.17148/IJARCCE.2016.58114
- [12] MISHRA, A; MISHRA, P. *Optical Communication with Time Division Multiplexing (OTDM) and Hybrid WDM/OTDM Pon*. International Journal of Science and Research (IJSR), India, Vol. 3, N°. 12, 2014, 1681-1684. www.ijer.net
- [13] KAUR, T; SONI, G. *Performance Analysis of Optical Time Division Multiplexing Using RZ Pulse Generator*. International Journal of Computer Science and Mobile Computing (IJCSMC), India, Vol. 4, N°. 10, 2015, 40-45. www.ijcsmc.com
- [14] 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/>
- [15] PAL, M; BANDYOPADHYAY, S; BISWAS, P; DEBROY, R; PAUL, M; SEN, R; DASGUPTA, K; BHADRA, S. *Study of Gain Flatness for Multi-Channel Amplification in Single Stage EDFA for WDM Application*. Springer: Opt Quant Electron, 2008, 1231-1243. DOI 10.1007/s11082-008-9193-x
- [16] HILL, K; MELTZ, G. *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview* (Invited Paper). Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, N°. 8, 1997, 1263-1276.
- [17] DURAK, F; ALTUNCU, A. *All-Optical Gain Clamping and Flattening in L-Band EDFAs using Lasing Controlled Structure with FBG*. ScienceDirect ELSEVER: Optical Fiber Technology, V. 45, 2018, 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.07.014>

- [18] YANG, J; MENG, X; LIU, C. *Accurately Control and Flatten Gain Spectrum of L-Band Erbium Doped Fiber Amplifier Based on Suitable Gain-Clamping*. ScienceDirect ELSEVER: Optics & Laser Technology, V. 78, 2016, 74-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.10.019>
- [19] BECKER, P. C; OLSSON, N. A; SIMPSON, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifier: Fundamentals and Technology*, Lucent Technologies, USA, 1999, 460.
- [20] Guoxin Lucent Technologies Network. Technologies Co., Ltd. <http://www.gxlu.com.cn>
- [21] MALIK, B. *Erbium-Doped Fiber Ring Laser Tuning using an Intra-Cavity Fabry-Perot Filter*. Master Thesis. Texas A&M University, USA, 2014.
- [22] PFEIFFER, T; SCHMUCK, H; BULOW, H. *Output Power Characteristics of Erbium-Doped Fiber Ring Lasers*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, N°. 8, 1992, 847-849.
- [23] SMITH, D; MAEDA, M; JOHNSON, J; PATEL, J; SAIFI, M; LEHMAN, A. OPTICS LETTERS, Vol. 16, N°. 6, 1991, 387-389.
- [24] Zyskind, J; Srivastava, A. *Optically Amplified WDM Networks*, Elsevier Inc. USA, 2011, 464.