

Studying and Modeling The Hybrid Optical Amplifier (HOA) for Improving its Properties and Performance

Dr. Faek Arraj^{*}
Dr. Afif Sakkour^{**}
Dr. Hadeel Essa^{***}
Naghham Abbas^{****}

(Received 16 / 10 / 2018. Accepted 2 / 9 / 2019)

□ ABSTRACT □

Hybrid Optical Amplifiers (HOA) are considered to be a promising and modern technology of great importance in high speed applications, which require a wide band of frequencies, and also in Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems, since they enhance system performance without using costly technologies.

This paper presents improving the performance of hybrid optical amplifier in terms of gain values, flatness, band width and noise figure. The properties of the hybrid optical amplifier, which is composed of two serially connected amplifiers: Raman Amplifier (RA) and Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), are compared and analyzed.

This research concentrates on the hybrid amplifier at both (C: 1530nm-1565nm) and (L: 1565nm-1625nm) bands for various cases of pumping. This amplifier is modeled using the MATLAB program, based on the propagation equations which represent the change in energy for distance and the rate equations that represent the change in the density of atoms in energy levels depending on time, and deriving analytical solutions for a two or three-level EDFA amplifier system in the absorption bands with wavelengths 980nm and 1480nm. The results are analyzed and optimal parameters are determined for both amplifiers in terms of input signal power, pump power, length of used fiber, etc. in each one.

Keywords: Erbium doped fiber amplifier, Raman amplifier, Hybrid optical amplifier, Gain flatness.

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

** Associate Professor, Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

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

**** Postgraduate Student (Doctorate), Department of Communication Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

دراسة ونمذجة مضخم ضوئي هجين لتحسين خصائصه وأدائه

د. فائق عراج*

د. عفيف صقور**

د. هديل عيسى***

نغم عباس****

(تاريخ الإبداع 16 / 10 / 2018. قبل للنشر في 2 / 9 / 2019)

□ ملخص □

تعد المضخمات الضوئية الهجينة تقنية واعدة وحديثة ذات أهمية كبيرة في التطبيقات عالية السرعة والتي تتطلب عصابة عريضة من الترددات، وكذلك في نظم ارسال عدة رسائل دفعة واحدة بتقسيم اطوال الامواج الى مجموعات، كونها تعزز أداء النظام دون استخدام تقنيات مكلفة.

تم في هذا البحث دراسة تحسين أداء المضخم الضوئي الهجين من حيث قيمة الريح وتسطحه، عرض العصابة الترددية ورقم الضجيج. وتمت مقارنة وتحليل خصائص المضخم الضوئي الهجين المكون من مضخمين موصولين على التتابع هما مضخم رامان ((RA) Raman Amplifier) ومضخم الليف المشاب بالاربيوم Erbium Doped Fiber (EDFA: Amplifier).

ركز هذا البحث على دراسة المضخم الهجين في كلا الحزمتين (L: 1565nm-1625nm), (C: 1530nm-1565nm) من اجل حالات الضخ المختلفة، حيث تمت نمذجة هذا المضخم بالاستعانة ببيئة MATLAB معتمدين على معادلات الانتشار التي تمثل تغير الاستطاعة بالنسبة للمسافة ومعادلات المعدل التي تمثل تغير كثافة الذرات في السويات الطاقية اعتماداً على الزمن، واشتقاق الحلول التحليلية لها من اجل نظام ثلاثي أو ثنائي المستوى لمضخم EDFA في حزم الامتصاص ذات الأطوال الموجية 980nm و1480nm، وتم تحليل النتائج واستنتاج البارامترات المثلى من اجل كلا المضخمين من حيث استطاعة إشارة الدخل، استطاعة المضخة، طول الليف المستخدم وغيرها في كل منهما.

الكلمات المفتاحية: مضخم الليف المشاب بالاربيوم، مضخم رامان، مضخم ضوئي هجين، تسطح منحنى الريح.

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

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

*** مدرس- قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

**** طالبة دراسات عليا(دكتوراه)- قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

مقدمة:

ترافق تطور نظم الاتصالات الضوئية مع تزايد الحاجة لعرض عصابة ترددات كبير ليوكب إرسال معطيات أكثر وبسرعة أعلى ولمسافات أطول، لذا تركز الاهتمام على دراسة المضخمات عريضة العصابة الترددية. ولقد كان استخدام مضخم EDFA للإرسال لمسافات طويلة حلاً بديلاً عن استخدام المكررات الالكتروضوئية، حيث يستخدم لتعويض الضياعات الناتجة ويمكن من الإرسال لمسافات طويلة تصل حتى عشرات الكيلومترات [1,2]. يمكن تقليل الضياعات في الشبكة الضوئية باستخدام مكررات إلكتروضوئية، لكن هذه الطريقة معقدة ومستهلكة للوقت ومكلفة بالنسبة لنظم التجميع بتقسيم طول الموجة الكثيف (Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)) بسبب تعدد مستويات المعالجة، مما يقلل من وثوقية النظام، إذا لرفع كفاءة الشبكة الضوئية متعددة القنوات استخدمت المضخمات الضوئية الصرفة مثل مضخم رامان ومضخم EDFA. تمتاز المضخمات الضوئية بعدة خصائص توضح أدائها في نظم الاتصالات والتطبيقات المختلفة من أهمها:

- ربح المضخم (Gain) وهو نسبة استطاعة الخرج الى استطاعة الدخل يقاس بالديسبل وفق العلاقة
$$G = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$$
- تسطح الربح (Gain Flatness) وهو عدم تغير قيمة ربح القنوات المختلفة أي إن الربح متساوي من أجل الأطوال الموجية المرسله، ومن ثم فإن منحنى ربح المضخم بتابعية طول موجة الاشارة الضوئية المرسله (منحنى طيف الربح) يكون مسطحاً وإذا لم يكن تسطح منحنى الربح محققاً فإن القنوات المختلفة ستخضع لربح مختلف ويؤدي منحنى طيف الربح تموجاً يعطى بالعلاقة:

$$\text{Ripple} = \frac{G_{max} - G_{min}}{2} \quad (1)$$

- رقم الضجيج (Noise Figure (NF)) يعبر عن قياس انخفاض نسبة الإشارة إلى الضجيج من أجل الإشارة التي تمر عبر المضخم.

إن استخدام مضخم رامان بمفرده لديه سيئات مثل التأثيرات اللاخطية، واستخدام EDFA بمفرده لديه منحنى طيف ربح غير مسطح حيث يتضمن منحنى طيف ربح المضخم على ذروة ربح ضيقة عند طول موجة 1530nm تقريباً وأخرى واسعة مع انخفاض ربح متمركز حول طول الموجة 1550nm، لذا توجد حاجة لبنية ذات عصابة ترددية عريضة قابلة للتكيف لتجنب سلبات هذه المضخمات، هذا الامر شجع الاهتمام بالمضخمات الضوئية الهجينة (Hybrid Optical Amplifier (HOA))، وكانت أهداف استخدامها هي: [3,4]

- 1- زيادة عرض حزمة الربح من أجل نظام WDM مع أقل تموج للربح خلال عرض الحزمة الفعال.
 - 2- تخفيض الضياعات الناتجة عن اللاخطيات.
 - 3- تجنب تقييدات استخدام التضخيم متعدد المراحل، أو مرشحات تسوية منحنى الربح عالية الكلفة التي تعتمد على منع الاشارة ذات الربح الاعظمي عند طول الموجة 1530nm حيث تكون ذروة ربح المضخم، من أجل الحصول على تسطح منحنى الربح.
- يوجد طرق واستراتيجيات عديدة استخدمت لتحسين خصائص المضخم الضوئي الهجين HOA لتعزيز أداء النظام، من حيث الربح، رقم الضجيج وتسطح منحنى الربح. [5]

حيث درست الابحاث السابقة والجارية حالياً تشكيلات عديدة للمضخمات الضوئية الهجينة من حيث طرق ربطها مع بعضها، عددها، عدد المضخمات المستخدمة، أو استخدام مرشحات لتسوية منحنى الريح توصل مع هذه المضخمات، وتم اختبار قيم مختلفة للبارامترات المميزة للمضخم الهجين وتأثيرها على أداء هذا المضخم مع الأخذ بالاعتبار خصائص المضخم مثل قيم الريح، عرض الحزمة أو تسطح منحنى الريح، وذلك بالاعتماد على المحاكى Optisystem أو VPItransmissionMaker [1,5].

تم تصميم ومحاكاة مضخم هجين مؤلف من مضخمى رامان و EDFA لتضخيم 32 قناة في الحزمة (1560nm-L (1600nm باستخدام المحاكى OPTISYSTEM، استخدم مضخمتين لهما نفس الاستطاعة وطول الموجة 300mW, 1490nm لضخ المضخمين واستخدم الضخ الخلفي من اجل كلا المضخمين، تم الحصول على ربح 38.52dB وتموج ربح 1.28dB ورقم الضجيج $4.5\text{dB} \pm 0.7\text{dB}$ دون استخدام أي تقنية لتسوية الريح. ثم تم اختبار الاداء باستخدام مرشح غوصي لتمرير الحزمة تم وضعه بين المضخمين فكان التموج 0.55dB والربح 38.46dB بينما بقي رقم الضجيج كما هو، أي اهتم هذا البحث بتحسين قيمة تسطح الريح فقط [6].

ايضا تم تصميم مضخم هجين مكون من مضخم رامان و EDFA واستخدام محاكى OPTISYSTEM لمحاكاته عند العمل في مجال الحزمتين C, L Band استخدمت 3 مضخات ذات طول موجة 1480nm واستطاعة 100mW كانت كثافة ذرات الارييوم المستخدمة بالاشابة 1000ppm عبر طول 5m. تم الحصول على تموج 2dB من اجل 40 قناة من أجل مسافة بين 80km-180km واستطاعة الدخل -5dBm، واستطاعة الخرج بين 1.49dBm حتى -13dBm من اجل المسافة المدروسة بين 90km حتى 180km [7].

كما صمم نظام WDM من أجل $20 \times 50\text{Gb/s}$ عبر مجال ترددي 1560nm-1577nm بلغت استطاعة الدخل 15dBm معدل الارسال 10Gb/s تم الحصول من خلال هذا التصميم على ربح 22.81dB ورقم ضجيج 7dB وتموج ربح 2.79dB وتمت المحاكاة باستخدام OPTISYSTEM، اختيرت بارامترات كلا المضخمين رامان و EDFA حيث كان تردد القنوات المرسله عبر WDM يتراوح بين 1530nm-1620nm من اجل 19 قناة بفاصل طول موجة 5nm، جرى تغيير كثافة ايونات الارييوم 250ppm حتى 1000ppm وتم اختيار الكثافة 1000ppm، اختير طول 5m لمضخم EDFA بعد دراسة اطوال مختلفة بين 1m حتى 40m تم اختبار استطاعة الدخل من -20dBm-0dBm لاختيار افضل استطاعة دخل -40dBm. اما مضخم رامان فقد درس المجال 1520nm-1620nm بفاصل 100nm واستطاعة دخل -40dBm، واستخدم 11 مضخة بترددات تتراوح بين 1420nm-1520nm بزيادة 10nm، ولاختيار المضخة الافضل تم اختبار قيم مختلفة لاستطاعة الضخ بين 50mW-250mW واختيرت المضخة ذات الاستطاعة 150mW كأفضل اداء، ايضا تم تحسين طول مضخم رامان بتغيير طوله بين 10km-100km واختيار الطول الافضل والذي تبين انه 45km [8].

اقترح البحث [9] مضخم هجين مكون من مضخمى رامان و EDFA لتوسيع عرض حزمة التضخيم لتضم 32 قناة WDM عبر الحزمة (1560nm-1600nm) L تم اختيار مواصفات كلا المضخمين بعد اختبار عدة قيم فكانت كما بالجدول:

EDFA		RAMAN	
Length: 13.5km	Pp: 300mW	Pp: 300mW	Length: 8.05km
Core/dopant radius: 2.2 μm	λ_p : 1490nm	λ_p : 1490nm	Dispersion: -85Ps/nmkm
Na: 24		T: 300K	Dispersion slop: -0.03ps/nm ² km
N concentration: $10 \times 10^{-24} [m^{-3}]$			Attenuation α : 0.2dB/km

استخدم الضخ الخلفي لكلا المضخمين، استخدم ليف (Dispersion Compensation Fiber DCF) كوسط ربح لمضخم رامان تم تحسين تسطح الربح باستخدام مرشح تمرير حزمة غوصي تردده المركزي 1580nm وعرض حزمته 11nm والغرض من هذا التصميم المقترح للحصول على ربح محسن ضمن مجال واسع من الترددات وحقق هذا المضخم المختلط ربح اعظمي 40dB .

تم تصميم مضخم هجين أيضاً [10] مكون من مضخم رامان وEDFA وجرى اختباره على عرض حزمة 91nm من أجل معدل ارسال 120Tb/s عبر 360km من ليف SMF بعد ان كان اقصى عرض حزمة مستمرة تم الحصول عليه 78nm تم استخدام 4 اشارات حامل ووصلت لمعدلين Dual-Polarization 256-Ary Quadrature Amplitude Modulation (DP-256QAM)، تقاد بأربع محولات من رقمي الى تشابهي Digital-To-Analogue Converters (DACs) واستخدم مرشح تمرير حزمة Gain Flattening Filter (GFF) لتسوية الربح ولتحسين شكل طيف الاشارة. كان متوسط NF=1.4dB وتم اختبار الاداء من حيث نسبة الاشارة للضجيج SNR ومعدل خطأ البت BER.

في حين تم في دراستنا الأخذ بالاعتبار جميع خصائص المضخم الهجين معاً دون إغفال مشكلة الضجيج الناتج عنه، حيث تم تصميم هذا المضخم بوجود الضجيج من خلال نمذجة وحل معادلاته باستخدام التابع ode45 ضمن ملف m.file في MATLAB والذي يعتمد الطرق العددية مثل Rung Kutta المستخدمة في Matlab مستوفياً متطلبات الدقة وزمن المعالجة المطلوبة، كما تم تصميم مضخم رامان باستخدام ليف معوض التشتت (Dispersion Composition Fiber (DCF)) واستخدم في تصميم المضخم الهجين، وجرى اختيار البارامترات التصميمية الافضل بعد دراسة مجال واسع من القيم، مثل طول المضخمات الضوئية المؤلفة للمضخم الهجين، استطاعة المضخة وطول موجتها، استطاعة الاشارة وكثافة ذرات الارييوم وغيرها، للحصول على أفضل أداء من حيث الربح والضجيج الناتج عنه من أجل تطبيقات DWDM.

ولايزال البحث في المضخمات الضوئية الهجينة مجال مفتوح ومستمر للتزويد بتضخيم عريض الحزمة ورياح مسطح.

أهمية البحث وأهدافه:

جاء استخدام المضخمات الهجينة للتغلب على سلبيات المضخمات المنفردة والاستفادة من ميزات كل منها والهدف الأساسي من تطبيق المضخمات الهجينة هو توسيع عرض الحزمة الضوئية من أجل نظام WDM، وتقليل الضياعات الناتجة عن التأثيرات اللاخطية ولمنع استخدام مرشحات تسوية منحنى الربح عالية الكلفة.

إن تحسين عرض حزمة الربح الناتج في المضخمات الضوئية هو الطريقة الأكثر فعالية للاستخدام الفعال لعرض حزمة الليف التي تؤدي إلى تعزيز عدد قنوات WDM. كما تعتبر دراسة ثبات قيمة الربح مقابل تغيرات استطاعة إشارة الدخل القضية المفتاحية في شبكات WDM. من هنا جاءت أهمية هذه الدراسة في البحث عن تصميم مضخم ضوئي هجين بمواصفات مناسبة للشبكات الضوئية للمسافات الطويلة جداً، وأجريت الدراسة واختبار أداء المضخم عن طريق نمذجة المضخم وتقييم أدائه بدراسة خصائصه (الربح، تسطح منحنى الربح، عرض حزمته، ورقم الضجيج) معاً.

طرائق البحث ومواده:

اعتمد هذا البحث على دراسة نموذج كلاً من مضخم رامان و EDFA المكونين للمضخم الضوئي الهجين بالاعتماد على المعادلات التي تصف عمل كل منهما، وذلك استناداً الى معادلات ماكسويل ومعادلات انتشار الاشارة الضوئية عبر الليف الضوئي ومعادلات المعدل لمضخم EDFA .

تم استخدام البيئة البرمجية MATLAB من اجل نمذجة المضخم الضوئي الهجين ودراسة تأثير البارامترات المختلفة على منحنيات الريج الناتجة ومن ثم تحليل النتائج.

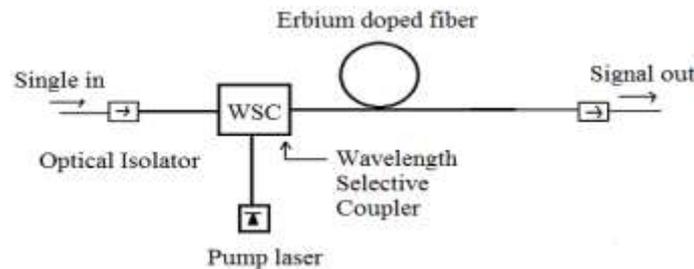
1- مضخم الليف المشاب بالاربيوم EDFA:

إن مضخم EDFA هو أكثر مضخمات الألياف الضوئية المستخدمة في مجال الاتصالات طالما أن نافذة التضخيم تتوافق مع نافذة الإرسال الثالثة للألياف الضوئية، حيث عند العمل بالنافذة 1550nm يكون تخميد الليف الضوئي اصغري، ولذا معظم مضخمات EDFA التجارية تعمل في الحزمة C، لكن في السنوات الأخيرة توسع عرض الحزمة ليضم الحزمتين C(1530nm-1565nm) و L(1565nm-1625nm) . [11-14]

يتكون مضخم EDFA بشكل أساسي كما هو مبين في الشكل (1) من:

- ليف ضوئي مشاب بالاربيوم.
- مضخة ليزرية.
- قارن طول موجة انتقائي.

يتم قرن الموجة الضوئية المراد تضخيمها مع اشارة الضخ بواسطة ناخب WSC كما هو مبين في الشكل (1)، وترسل ضمن الليف الضوئي المشاب بالاربيوم، ويوضع عادة عازل (Isolator) على خرج المضخم لمنع الانعكاس.

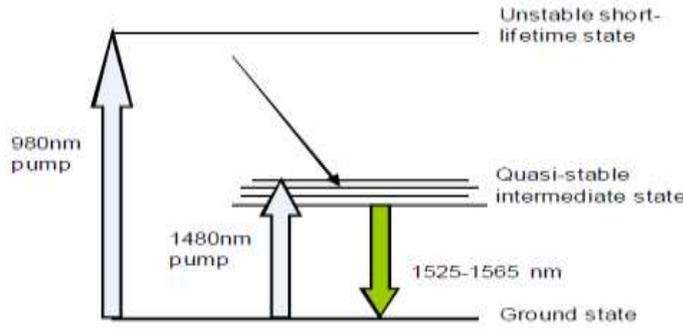


الشكل (1) مضخم ليف ضوئي مشاب بالاربيوم EDFA في حالة الضخ الأمامي

يوجد عدة حزم من الأطوال الموجية المناسبة للضخ من اجل ضخ ايونات الاربيوم إلى سوية طاقة أعلى، وتستخدم حالياً أطوال الموجة 980nm, 1480nm والتي أثبتت أنها الأطوال الموجية الأكثر فعالية. إن معظم ليزرات الضخ ذات طول الموجة 980nm تقدم استطاعة ضخ تجارية 100mW وضجيج منخفض في حين استخدام المضخة ذات طول الموجة 1480nm تتطلب ألياف ضوئية أطول واستطاعات أعلى أي إن الضخ بـ 980nm أكثر فاعلية حيث يتطلب استطاعة ضخ اقل بكثير للحصول على نفس الأداء من حيث الضجيج مقارنة مع طول موجة الضخ 1480nm أو 800nm . [15]

يمكن اعتبار مخطط الطاقة لمضخم الألياف المشابة بالاربيوم عبارة نظام ذري ثلاثي او ثنائي المستوى عند الضخ بطول موجة ضخ 980nm أو 1480nm على الترتيب، أي يوجد سويتين او ثلاث سويات طاقة لذرات الاربيوم وهي

السوية الأساسية الأرضية بكثافة ذرات $N1$ والسوية الثانية سوية مهيجة وتسمى أيضاً سوية لاستقرارية ذات عدد ذرات $N2$ والسوية الثالثة السوية المهيجة ذات عدد الذرات $N3$. ويظهر الشكل (2) مخطط مستوى الطاقة الخاص بـ Er^{+3} . يتحقق الانعكاس الإسكاني (Population Inversion) في مضخم EDFA من خلال الإصدار المحثوث (Stimulated Emission)، نتيجة ضخ الليف المشاب بالاربيوم بإشارة الضخ الضوئية، ترتفع ذرات الاربيوم الموجودة في مستويات الطاقة الأرضية إلى السوية المهيجة بعد امتصاصها لفوتونات المضخة وتستقر في السوية الثالثة لزمناً قصيراً جداً $1\mu s$ ، ثم تعود إلى السوية الثانية حيث تبقى فيها زمن $10ms$ لتعود إلى السوية الأرضية فتحرر نتيجة هذا الانتقال طاقة على شكل فوتونات، أي ينتج ضوء متماسك عند تردد واحد أو عدة ترددات بنفس الوقت يوافق ترددات الإشارات المراد تضخيمها، أي يحدث التضخيم عند حدوث الانعكاس الإسكاني بين السويتين 1 و2، علماً أنه يجب إثارة ما لا يقل عن نصف إجمالي تعداد أيونات الإربيوم في المستوى 1 إلى المستوى 2 للحصول على انعكاس للمجموعة الإسكانية.



الشكل (2) سويات الاستطاعة الثلاثة للاربيوم في زجاج السيليكا المضيف

العيب الرئيس في EDFA هو أن عرض حزمة منحنى طيف الريح فقط حوالي $30-40nm$ ، إلى جانب ذلك، فهو غير مسطح أي لكل طول موجة من الإشارات المجمع المرسل بتقنية WDM والمراد تضخيمها ربح مختلف عن الأخرى ولديه ذروة ربح عالية ضيقة عند $1532nm$ [16]. لكنه من جهة أخرى يضخم القنوات بشكل منفصل ويتجنب مشكلة إشباع الريح في أنظمة WDM.

يتضمن النموذج الرياضي الذي يصف عمل مضخم EDFA نوعين من المعادلات وهما معادلات المعدل (rate equations) وهي معادلات تفاضلية لاخطية أحادية البعد عادية تعبر عن تغير كثافة الأيونات زمنياً في السويات الطاقة الثلاث، ومعادلات الانتشار التي تصف تغير استطاعة كل من الإشارة P_S والمضخة P_P وضجيج الإصدار العفوي المضخم P_{ASE} على طول الليف.

يتم الحصول على ربح EDFA من خلال حل هذه المعادلات على طول الليف الضوئي ويمكن التعبير عن الريح بالمعادلة الآتية: [17]

$$G(\lambda)[dB] = 4.3\Gamma_S(\lambda)[\bar{N}_2\sigma_S^e(\lambda) - \bar{N}_1\sigma_S^a(\lambda)]L \quad (2)$$

حيث L طول الليف الضوئي المشاب بالاربيوم، Γ_S : عامل التقاطع بين إشارة الدخل والقلب المشاب بالاربيوم أي يمثل مقدار التداخل بين النمط الضوئي و توزيع أيونات الاربيوم ضمن القلب، σ_S^e, σ_S^a : المقطع العرضي للامتصاص

والانبعاث من أجل طول موجة الإشارة، ويعطى المقطع العرضي للانبعاث وفق علاقة Mc Lambert relationship التالية:

$$\sigma^e(\nu) = \sigma^a(\nu)e^{(E-h\nu)/KT} \quad (3)$$

حيث E طاقة الانتقال من السوية الأرضية الى السوية المحرصة، ν تردد، h ثابت بلانك، K ثابت بولتزمان، T درجة الحرارة، σ^a : المقطع العرضي للامتصاص.

\bar{N}_2, \bar{N}_1 متوسط كثافة ذرات الارييوم في السويتين الأرضية والعليا المهيجة، وتعطى بالعلاقة:

$$\bar{N}_2 = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) dz \quad (4)$$

$$\bar{N}_1 = \frac{1}{L} \int_0^L N_1(z) dz \quad (5)$$

حيث من أجل إشارة واحدة ومضخة واحدة تعطى كثافة الذرات N_2 المتواجدة كتابع للموقع z على طول الليف الضوئي وفق العلاقة: [18]

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a}{h\nu_s}I_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^a}{h\nu_p}I_p(z)}{\frac{\tau(\sigma_s^a + \sigma_s^e)}{h\nu_s}I_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^a + \sigma_p^e)}{h\nu_p}I_p(z) + 1} N \quad (6)$$

حيث N كثافة الذرات الكلية $N=N_1+N_2$ نفرض أن N مستقلة عن z .

τ : زمن حياة الذرات في السوية المهيجة، σ_p^e, σ_p^a : المقطع العرضي للامتصاص والانبعاث من أجل طول موجة المضخة، ν_s : تردد الإشارة، ν_p : تردد المضخة، $I = \frac{\Gamma P}{A}$ شدة الموجة، حيث P استطاعة الإشارة، Γ عامل التقاطع، A السطح الفعال لقلب الليف.

يمكن نمذجة هذه معادلات مع الأخذ بالاعتبار الدقة المطلوبة والاعتبارات المتعلقة بزمن معالجة المحاكاة التي تعتبر ذات أهمية خاصة في ظل بيئة التشغيل MATLAB.

2- مضخم رامان (RAMAN Amplifier):

تعتمد مضخمات رامان على تبعثر رامان المحثوث ((SRS) Stimulated Raman Scattering)). ينشأ ربح الإشارة الصغير بسبب تحويل الاستطاعة من حزمة ضوئية قوية ذات طول موجة أدنى تسمى إشارة الضخ (المضخة) إلى الإشارة المراد تضخيمها. في الألياف الضوئية، تتوافق ذروة التضخيم مع تردد الإشارة الذي يقل بـ (13.2THz) أو 100nm من تردد الضخ؛ هذا الفرق الترددي يسمى إزاحة ستوكس (Stokes Shift)، وترجع هذه الإزاحة إلى استطاعة الفونونات الضوئية التي تمثل نمط اهتزاز الوسط [13].

الميزة الرئيسية لمضخم رامان هي أن منحنى طيف ربحه واسع جداً، ويمكن تغيير شكله باختلاف عدد المضخات وأطوال موجاتها. هذان الجانبان يجعلان مضخمات رامان المكون الرئيس للشبكات الضوئية. تتمثل العيوب الرئيسية لمضخمات رامان في ضعف كفاءة الضخ عند استطاعة منخفضة للإشارة، وهذا يتطلب استخدام أشعة الليزر عالية الاستطاعة باهظة الثمن قادرة على توفير استطاعة عظمى في الألياف الضوئية أحادية النمط.

إن ضياع الاقتران منخفض لا يكاد يذكر وكذلك اختلاط الكلام (Crosstalk) عبر القنوات، مما يجعلها أكثر كفاءة بالنسبة لنظام DWDM. كما يمكن جمعها مع مضخمات EDFAs لتوسيع عرض حزمة الربح المسطح.

يشتمل النموذج العددي الكامل لمضخم رامان المطبق في المحاكاة على جميع التأثيرات الفيزيائية الأكثر أهمية التي تؤثر على ربح مضخم رامان.

يمكن وصف التغيرات الحاصلة في استطاعة المضخة والإشارات في مضخم رامان بمجموعة من المعادلات التفاضلية العادية (Ordinary Differential Equation (ODE))، تسمى معادلات الموجات المزدوجة، بمكاملة هذه

المعادلات والتبسيط نحصل على استطاعة الإشارة الضوئية $P_S(L)$ عند مسافة $(z=L)$: [13, 19]

$$P_S(L) = e^{gP_{p0}L_{eff} - \alpha_s L} P_S(0) = G(L)P_S(0) \quad (7)$$

حيث أن $P_S(0)$ استطاعة الإشارة عند دخل المضخم، L هو طول المضخم، $G(L)$ هو ربح المضخم وهو نسبة استطاعة الإشارة عند خرج المضخم $P_S(L)$ الى الاستطاعة عند دخل المضخم $P_S(0)$. ويعطى ربح مضخم رامان بالديسبل عندما تكون اشارة الضخ المحقونة في الليف بنفس اتجاه الاشارة المراد تضخيمها (الضخ بالاتجاه الأمامي) بالعلاقة: [20]

$$G(L)[dB] = 10 \log(e^{gP_{p0}L_{eff} - \alpha_s L}) = 4.343(gP_{p0}L_{eff} - \alpha_s L) \quad (8)$$

حيث g هي كفاءة ربح مضخم رامان $g = \frac{\gamma_R}{A_{eff}}$ يقاس بـ $[1/kmW]$ ، A_{eff} السطح الفعال لقلب الليف يقاس بوحدة $[\mu m^2]$ ، γ_R معامل الربح $[m/W]$ ، α_p ، α_s : معامل تخميد الليف الضوئي عند طول موجة الإشارة وعند طول موجة المضخة على الترتيب يقاس بوحدة $[\frac{dB}{km}]$ ، P_{p0} : استطاعة المضخة $[W]$ ، L : طول الليف الضوئي $[m]$.

L_{eff} : طول ليف مضخم رامان الفعال ويعطى بالعلاقة: [20]

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha_p} \quad (9)$$

في حالة الضخ الخلفي (وفيه يتم حقن اشارة الضخ باتجاه معاكس لاتجاه الاشارة المرسله) يكون الربح: [20]

$$G_{backward} = \frac{e^{(gP_{p0}L_{eff})}}{\frac{gP_{p0}}{e^{\alpha_{lp}}}} e^{\left[-\frac{gP_{p0}}{\alpha_{lp}} e^{-\alpha_{lp}(L-z)} - \alpha_{ls} z \right]} \quad (10)$$

α_{ls} , α_{lp} : معامل تخميد الليف عند طول موجة إشارة الضخ والقناة على الترتيب مقاس بوحدة $[\frac{1}{m}]$.

يعطى ربح مضخم رامان في حالة الضخ الثنائي (عندما يتم ضخ الليف بإشارتي ضخ واحدة بالاتجاه الامامي وأخرى بالاتجاه الخلفي): [20]

$$G_{Bi} = e^{(sgP_{p0}L_{eff} - \alpha_{ls} z)} + e^{\left[\frac{(1-s)gP_{p0}}{\alpha_{lp}} e^{-\alpha_{lp}(L-z)} - e^{-\alpha_{lp}L} - \alpha_{ls} z \right]} \quad (11)$$

حيث S نسبة استطاعة المضخة المدخلة في الاتجاه الأمامي وتأخذ قيم بين $(0 \leq S \leq 1)$ حيث $(S=1)$ في حالة الضخ الامامي أي ان استطاعة المضخة تنتشر بالاتجاه الامامي بنسبة 100%، وعندما $(S=0)$ فإن نسبة استطاعة المضخة المدخلة بالاتجاه الامامي تساوي 0% بينما تدخل بنسبة 100% بالاتجاه الخلفي وفي حالة الضخ الثنائي الاتجاه فان قيمة $S=0.5$ ، P_{p0} : استطاعة إشارة المضخة الابتدائية عند $(z=0)$. اعتمدت المحاكاة على استخدام البيئة البرمجية MATLAB في حل معادلات الموجات المزدوجة للحصول على البارامترات التصميمية لمضخم رامان العامل في الحزمتين C, L-Band، ولنمذجة مضخم رامان RA بجميع التكوينات، الأمامي والخلفي والثنائي الاتجاه.

3- المضخم الهجين (HOA (RAMAN-EDFA

تعد المضخمات الهجينة (HOA) تقنية واحدة وممكنة لمستقبل الأنظمة DWDM لعدة تيرايت [21]، و يصمم HOA لزيادة طول الليف و للحد من مساوئ اللاخطية، وبالتالي فإن تصميم HOA الأفضل يعتبر مسألة معقدة مع

درجات متعددة من الحرية، ربحه الكلي هو جداء الأرباح الفردية للمضخمات التسلسلية [21]، فيكون الربح الإجمالي

GR للمضخم المقترح (RA-EDFA) كما يلي: [2]

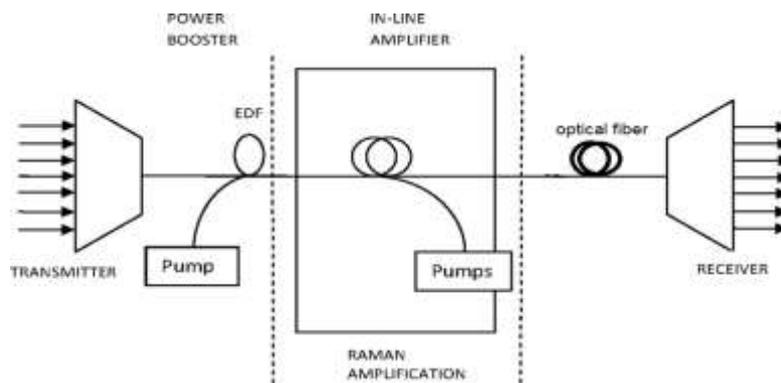
$$G_R = G_{Raman} \times G_{EDFA} \quad (12)$$

وبالديسبل:

$$G_R[dB] = G_{Raman}[dB] + G_{EDFA}[dB] \quad (13)$$

إن استخدام هذه المضخمات هي الطريقة الأفضل للاستفادة المثلى من عرض نطاق الألياف الضوئية المتوفر عن طريق استخدام مجموعات مختلفة من المضخمات الضوئية ذات نطاقات طول موجة مختلفة.

يمكن توصيل المضخمات على التتابع أو التفرع وفي كلا الحالتين يسمى بالمضخم الضوئي الهجين HOA. أظهرت الدراسات السابقة أن ضجيج مضخمات رامان أقل من EDFA، لذا فإن أفضل طريقة لتحقيق ربح أعلى مع رقم ضجيج أقل أو عرض حزمة تضخيم أوسع هو استخدام EDFA في تركيبه مع مضخم رامان [11]. هذا المقال هو امتداد للدراسات السابقة التي أعطت نتائج مختلفة، حيث سنتوسع في تلك النتائج من خلال نمذجة وتصميم مضخم HOA باستخدام البيئة البرمجية MATLAB والتي تتيح لنا اختيار البارامترات والعوامل لتحسين الأداء والحصول على نتائج جديدة مع الأخذ بالحسبان خصائص المضخم المدروسة.



الشكل (3) التضخيم الهجين في نظام ضوئي WDM

النتائج والمناقشة:

تم تصميم نموذج لمضخم ضوئي هجين مكون من مضخم رامان و EDFA موصولين على التتابع وتمت المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB وبالاعتماد على المعادلات السابقة (10÷1) لاختبار الأداء والتحقق من فعالية المضخم وذلك بعد اختيار القيم الأولية للبارامترات التصميمية والثوابت الخاصة بكل مضخم من المضخمات المكونة للمضخم الهجين، كما هو مبين في الجدولين (1) و (2):

الجدول (1) بارامترات مضخم EDFA:

$P_p[mW]$ (استطاعة الضخ)	$P_s[\mu W]$ (استطاعة الإشارة)	$\lambda_p[nm]$ (طول موجة المضخة)	$\lambda_s[nm]$ (طول موجة الإشارة)
100	30	980	1550
Γ (عامل التقاطع)	D[μm] قطر القلب	$\tau[s]$ (زمن حياة الايونات في السوية المهيجة)	L[m] (طول الليف الضوئي)
0.722	5.5	8×10^{-3}	10

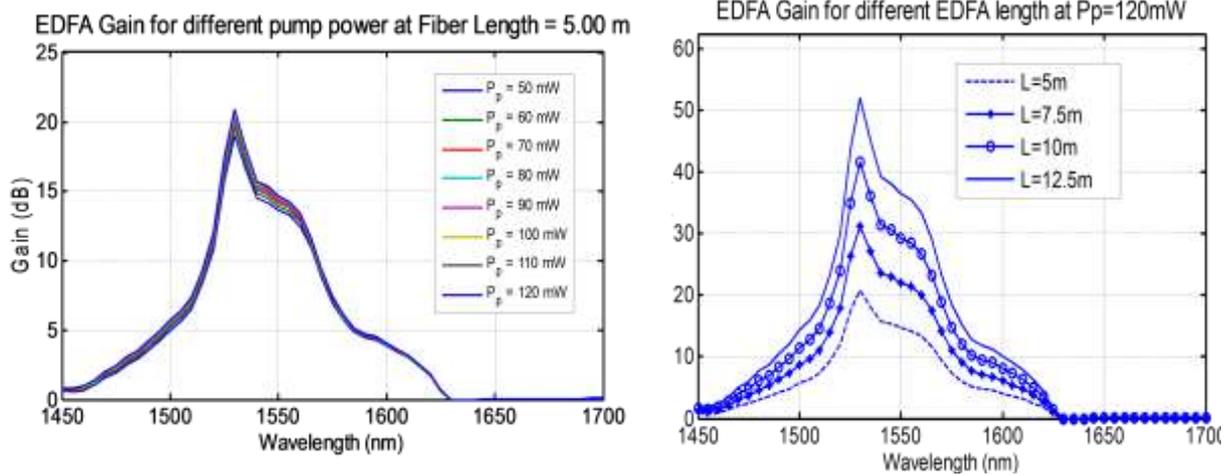
الجدول (2) بارامترات مضخم RAMAN:

$P_p [mW]$ (استطاعة الضخ)	$\lambda_p [nm]$ (طول موجة المضخة)	$g_{max} [\frac{1}{kmW}]$ (عامل الريح)	$L [km]$ (طول الليف)
300	1450	1.55	100
n	$A_{eff} [\mu m^2]$ (السطح الفعال لقلب ليف SMF)	$\alpha_p [dB/km]$ (عامل التخميد المضخة)	$\alpha_s [dB/km]$ (عامل التخميد الإشارة)
1.45	82	0.263	0.2

تم اختبار أداء المضخم الهجين في حالات مختلفة للضخ ومن أجل قيم مختلفة لاستطاعات وأطوال موجة المضخات وتم تقييم الأداء وتحليل النتائج من حيث قيمة الريح وتسطح منحنى الريح وعرض الحزمة الضوئية.

1- دراسة طيف ربح مضخم EDFA:

تمت نمذجة مضخم EDFA باستخدام MATLAB لدراسة طيف ربحه حيث تم استخدام ليف ضوئي SMF ذو مواصفات مذكورة بالجدول (1)، وتمت دراسة تأثير كل من استطاعة الضخ وطول الليف الضوئي المشاب بالاريوم على أداء هذا المضخم، يبين الشكل (4,a) تغير ربح مضخم EDFA بتابعية طول موجة الإشارة مع تغيير طول الليف الضوئي عند استطاعة ضخ 120mW، حيث تم اختيار قيمة استطاعة الضخ بعد اختبار عدة قيم تتراوح بين (50mW-120mW) كما هو موضح في الشكل (4,b)، ولوحظ أنه بزيادة استطاعة الضخ تزداد قيمة الريح بشكل بسيط لكنها لا تؤثر على شكل منحنى طيف الريح أو تسطحه، حيث ازداد الريح بمقدار 2dB مع زيادة استطاعة ضخه من 50mW حتى 120mW.



الشكل (4) طيف ربح مضخم EDFA (a) من أجل أطوال مختلفة للليف الضوئي عند استطاعة ضخ 120mW، (b) ربح EDFA من أجل استطاعات ضخ مختلفة عند طول $L=5m$.

نلاحظ أيضاً من الشكل (4,a) تموج طيف ربح المضخم الذي يعمل في الحزمة C و لديه ذروة ربح عند طول الموجة 1530nm وان الريح منخفض جداً في مجال الحزمة L، حيث انه من أجل استطاعة دخل $30[\mu W]$ واستطاعة

المضخة تتراوح بين (50mW – 120mW) وطول موجتها 980nm بلغت ذروة الريح تقريباً 20dB من اجل طول 5m لليف المشاب بالاربيوم، و 30dB من اجل طول 7.5m و 40dB من اجل طول 10m لليف و 50dB تقريباً من اجل ليف مشاب بطول 12.5m عند طول الموجة 1530nm ومن اجل استطاعة ضخ 120mW. أي يزداد ربح مضخم EDFA مع زيادة طوله وهذا يعود إلى ازدياد كمية الايونات الممتصة من قبل الوسط وازدياد الانعكاس الاسكاني الموافق (population inversion).

ونظراً لكون مضخم EDFA لا يستطيع تضخيم كل القنوات بنفس السوية، درست طرق متعددة لتعويض ذلك خلال السنوات القليلة الماضية لتقليل تغيرات الريح، وتم تحقيق تسطح منحنى الريح من اجل تضخيم 16 قناة باستخدام مرشح لتسوية منحنى الريح، حيث حققت هذه الدراسة ربح مسطح بقيمة 8.6dB مع تموج ربح 4.4dB خلال المجال 1535nm-1605nm. كما تم تصميم مرشح ليف براغ الذي يعمل كمسوي ربح حيث يتم الحصول على تسطح بمنحنى الريح بعد المرور عبر مرشح ليف براغ الذي يعمل كعكاس لطول الموجة 1530nm الموافق لذروة الريح [22].

وأجريت دراسات [23] على مضخم رامان الذي يعطي تسطح منحنى ربح في المجال 1480nm-1511nm، كما صمم [21] مضخم هجين ذو مرحلتين تضخيم هما مضخم رامان يليه مضخم EDFA من اجل نظام DWDM باستخدام المحاكى OPTISYSTEM وكان لكل طريقة ايجابياتها وسلبياتها، وبعد دراسة مستفيضة حول ذلك لوحظ أن المضخم الهجين المؤلف من مضخم رامان ومضخم EDFA يعتبر من أكثر التقنيات الواعدة التي تمكن من الحصول على تسطح منحنى ربح لمضخم EDFA.

لذا فان الجهود كانت تهدف للحصول على بناء فعال للمضخم الهجين. إن البارامترات المستخدمة من اجل هذا المضخم هي طول موجة المضخة واستطاعة الضخ وطول الليف المشاب بالاربيوم. تابعنا ما بدأت فيه تلك الدراسات ودرسنا قيم تصميمية مختلفة للمضخمات المكونة للمضخم الهجين وحصلنا على النتائج التالية:

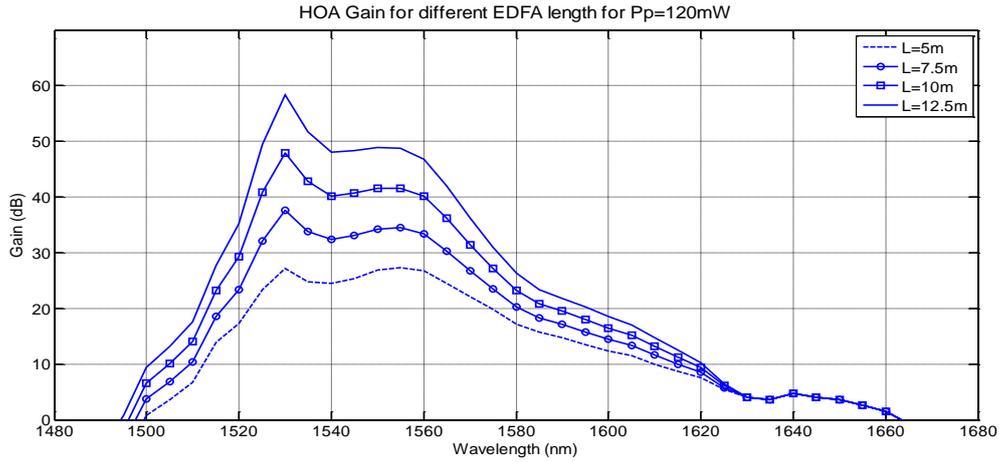
2- دراسة تأثير طول مضخم EDFA واستطاعة ضخه على طيف ربح المضخم الهجين:

تم اختبار الأداء بدراسة طيف ربح المضخم الهجين من اجل طرق ضخ مختلفة لمضخم رامان وتمت دراسة تأثير كل من طول ليف مضخم EDFA واستطاعة ضخه على منحنى الريح.

2-1- دراسة ربح المضخم الهجين في حالة الضخ الأمامي:

تم استخدام ليف ضوئي SMF مشاب بالاربيوم بطول يتراوح بين (5m-12.5m) عامل التشتت له 17ps/nmkm للحصول على مضخم EDFA كمرحلة أولى للتضخيم الهجين واستخدمت مضخة ذات طول موجي 980nm واستطاعة تتراوح بين (50mW-120mW)، واستخدم ليف SMF بطول 100km كمضخم رامان ليشكل مرحلة ثانية للتضخيم الهجين وتم ضخه ضخ أمامي بمضخة ذات طول موجة 1450nm واستطاعة 300mW، تم اختبار أداء هذا المضخم الهجين من اجل قيم مختلفة لاستطاعة ضخ مضخم EDFA، يبين الشكل (5) طيف ربح المضخم الهجين من اجل عدة اطوال لليف الضوئي عند ضخ مضخم EDFA باستطاعة ضخ 120mW.

تبين لنا من المنحنيات المبينة بالشكل (5) زيادة واضحة في قيمة الريح من اجل نفس طول الليف مقارنة مع استخدام مضخم EDFA بمفرده، أيضاً هناك زيادة في تسطح منحنى الريح عند استخدام المضخم الهجين، حيث تم حساب قيمة تموج الريح وفق العلاقة (1) وتراوحت بين (1.42dB-5.525dB) على المجال الترددي (1530nm-1570nm) من أجل طول ليف EDFA بين (5m-12.5m).

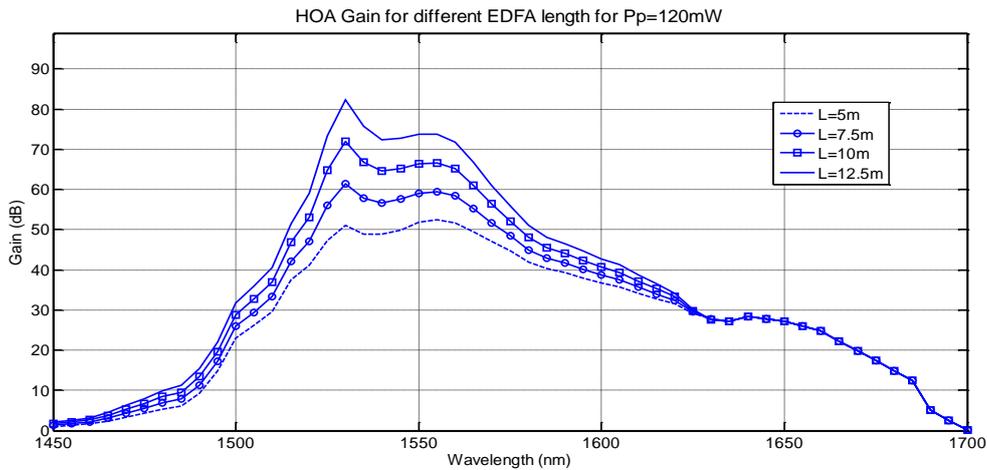


الشكل (5) ربح مضخم هجين HOA من اجل اطوال مختلفة للليف الضوئي عند استطاعة ضخ 120mW في حالة الضخ الأمامي

نلاحظ أيضاً انعدام الريح عند أطوال الموجة الواقعة في جزء من النافذة S- Band (1460nm-1530nm) وذلك لكون تردد الفوتونات الناتجة عن الانبعاث المحثوث عند الانتقالات الطاقية في مخطط السويات الطاقية لذرات الارييوم في مضخم EDFA تقع خارج هذا المجال الترددي، كما أن ربح مضخم رامان في حالة الضخ الأمامي معدوم في هذا المجال.

2-2- دراسة ربح المضخم الهجين في حالة الضخ الثنائي:

تم اختبار أداء المضخم الهجين في حالة تطبيق ضخ ثنائي الاتجاه لمضخم رامان أي يتم ضخ الليف بإشارتي ضخ واحدة بالاتجاه الامامي (اتجاه الاشارة المراد تضخيمها) وأخرى بالاتجاه الخلفي (باتجاه معاكس لاتجاه الاشارة) ومن اجل نفس البارامترات المستخدمة مسبقاً، يبين الشكل (6) انه في حالة الضخ الثنائي تتضاعف قيمة الريح لتصل إلى 52.35dB من اجل طول الليف المشاب بالارييوم 5m وحتى 82.26dB من اجل طول 12.5m، كما نلاحظ تحسن تسطح منحنى الريح مقارنة مع الضخ الامامي من خلال حساب التموج باستخدام العلاقة (1) والذي تراوح بين (1.795dB- 4.965dB) وذلك على مجال عرض الحزمة (1530nm-1570nm)، كما تجاوزت قيمة الريح 20dB خلال المجال 1460nm- 1680nm.



الشكل (6) طيف ربح مضخم هجين HOA من اجل اطوال مختلفة للليف عند استطاعة ضخ 120mW في حالة الضخ الثنائي

لاحظنا أيضاً في كلا طريقتي الضخ انه مع زيادة استطاعة ضخ مضخم EDFA من 50mW إلى 120mW ازداد الريح بمقدار 2dB فقط لكل حالات الضخ الامامي والخلفي والثنائي الاتجاه.

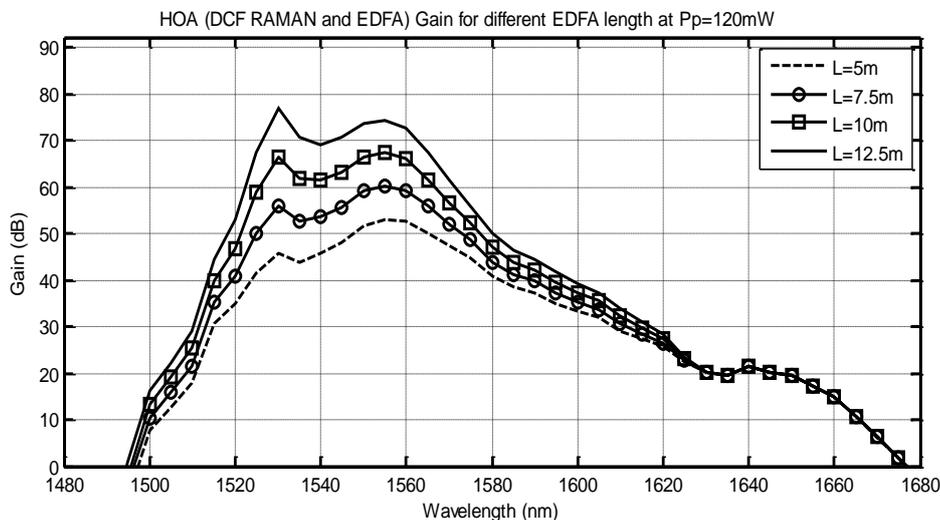
3- دراسة تأثير استخدام ليف ضوئي معوض التشتت (DCF) كمضخم رامان على أداء المضخم الهجين:

يتكون الليف الضوئي المعوض التشتت من ليف ضوئي يملك تصميم خاص حيث يكون فيه معامل التشتت سالب بينما يكون التشتت في ليف الإرسال SMF موجب، السطح الفعال لقلب الليف $A_{eff} = 20\mu m^2$ ، عامل التخمد للليف $\alpha_{DCF} = 0.239dB$ ، ينسبب التشتت اللوني الناتج عن تغير قرينة انكسار قلب الليف بتابعية طول موجة الاشارة المرسله بانبساط في عرض النبضات الضوئية المرسله ومن ثم حدوث تداخل بينها وصعوبة كشفها ولذا وباختيار مناسب لطول ليف DCF يتم تعويض التشتت اللوني المتراكم الناتج عن ليف الإرسال SMF [24].

تم اختبار اداء المضخم الهجين من اجل استخدام ليف DCF كمضخم رامان وحصلنا على النتائج التالية:

3-1- دراسة ربح المضخم الهجين المكون من (DCF_RAMAN+ EDFA) في حالة الضخ الأمامي:

يبين الشكل (7) طيف ربح مضخم هجين مكون من مضخم EDFA باستخدام ليف SMF ومضخم رامان يستخدم ليف DCF، حيث تبين من خلال المنحنيات الموجودة بهذا الشكل أنه في حالة استخدام ليف DCF لاحظنا زيادة واضحة في قيمة الريح وعرض الحزمة حيث وصلت قيمة الريح العظمى إلى 53dB, 60dB, 67dB, 76dB من اجل طول ليف مضخم EDFA 5m, 7.5m, 10m, 12.5m على التوالي خلال المجال (1460nm-1690nm)، وقياس قيمة تموج الريح وفق العلاقة (1) وجدنا أن قيمته وفقاً للأطوال المدروسة لمضخم EDFA هي على الترتيب 4.685dB, 3.735dB, 2.955dB, 3.81dB حيث يتضح لنا أن قيمة التموج تتناقص مع زيادة طول الليف في هذه الحالة.

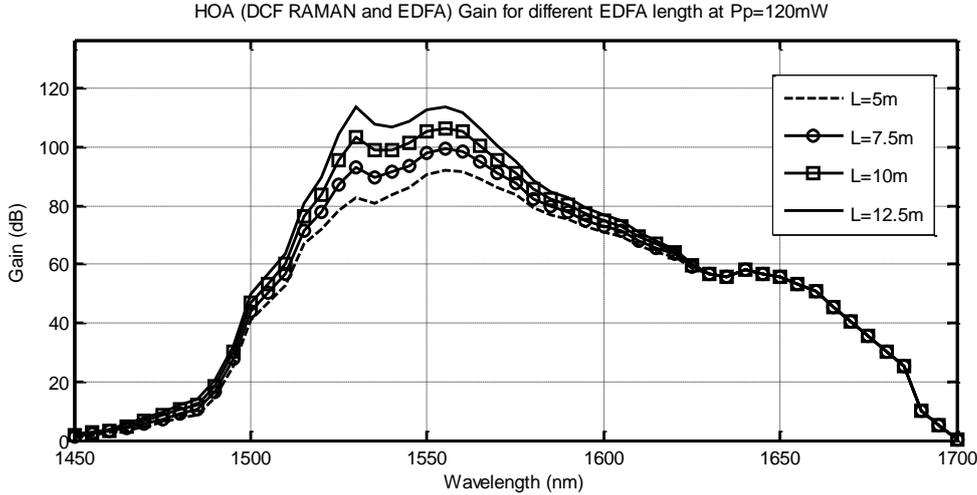


الشكل (7) طيف ربح مضخم هجين HOA من اجل اطوال مختلفة للليف عند استطاعة ضخ 120mW باستخدام ليف DCF مع ضخ امامي

3-2- دراسة ربح المضخم الهجين المكون من (DCF_RAMAN+ EDFA) في حالة الضخ الثنائي:

في هذه الحالة يتم تثبيت جميع بارامترات المضخم الهجين ويتم دراسة طيف الريح من اجل أطوال مختلفة للليف المشاب واستطاعات ضخ EDFA مختلفة، وتبين لنا من خلال المنحنيات الناتجة في الشكل (8) أدناه تناقص تموج الريح مع

زيادة طول الليف في حين أن زيادة استطاعة الضخ لم تبدي تأثير واضح في شكل طيف الريح ولوحظ أيضاً الزيادة الكبيرة في قيمة الريح عند استخدام ليف DCF حيث تجاوز الريح الاعظمي الـ 100dB عند طول ليف فوق 7m، كما وجدنا أن عرض حزمة الريح المسطح بقيت كما هي في حالة استخدام ليف SMF، بالمجال (1530-1570)nm، بالمقابل تجاوزت قيمة الريح الـ 20dB على كامل المجال تقريباً بين (1470-1700)nm.



الشكل (8) طيف ربح مضخم هجين HOA حيث إن مضخم رامان يستخدم ليف DCF من أجل أطوال مختلفة لليف EDFA عند ضخه باستطاعة 120mW في حالة الضخ الثنائي

نلاحظ تحسن التموج مع زيادة طول الليف المشاب بالاريوم وتراوحت قيمه بين (5.65dB- 4.75dB- 4.1dB- 3.5dB) على الترتيب من أجل الأطوال المدروسة لليف المشاب بالاريوم (5m- 7.5m- 10m- 12.5m). كما لاحظنا أن تأثير زيادة استطاعة ضخ مضخم EDFA على ربحه كان مشابهاً لحالة استخدام ليف SMF.

a. ضجيج المضخم الهجين:

هو مقدار الضجيج الذي يضيفه المضخم على الإشارة الداخلة حيث ينشأ في المضخم الهجين ضجيج ناتج عن المضخمات المكونة له، ويعبر رقم الضجيج (Noise Figure (NF) أو ما يدعى بعامل الضجيج عن قياس انخفاض نسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج من أجل الإشارة التي تمر عبر المضخم وهو مقدار يستخدم لاختبار أداء المضخم، يعرف بأنه نسبة استطاعة الإشارة إلى الضجيج المطبقة على مرابط دخل المضخم إلى استطاعة الإشارة إلى الضجيج المطبقة في الخرج. [25]

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (14)$$

لدى مضخم رامان RA أربعة مصادر للضجيج تساهم في تدهور NF، وهي: [26]

1- الانبعاث العفوي المضخم (Amplified Spontaneous Emission (ASE): هو الضجيج النموذجي لأي مضخم ضوئي، مشتق من الاصدار العفوي للفوتونات، في المستقبل، حيث يكون عنصر الضجيج السائد هو إشارة ASE، يمكن كتابة NF كالمعادلة التالية (15):

$$NF = \frac{2P_{ASE}}{Gh\nu B_0} + \frac{1}{G} \quad (15)$$

حيث G هو الريح الضوئي، h هو ثابت بلانك، ν : التردد الضوئي لإشارة الدخل، و B_0 : عرض العصابة الترددية للضجيج في المجال الترددي الذي يقاس عبره الـ ASE ويمكن تعريفه بأنه عرض عصابة ترددية لمرشح مثالي عندما يمرر نفس استطاعة الإشارة التي يمررها مرشح حقيقي عندما يتعرض كلاهما لنفس الضجيج العشوائي، و P_{ASE} هي استطاعة ضجيج ASE وتعطى بالمعادلة (16): [26, 3]

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G - 1)h\nu B_0 \quad (16)$$

n_{sp} هو عامل الانقلاب الاسكاني يمثل عدد الذرات التي انتقلت محققة شرط الانقلاب الاسكاني يعطى بالعلاقة (17)، B_0 هو عرض العصابة الترددية المستخدمة لقياس الضجيج، K هو ثابت Boltzman، و T هي درجة الحرارة بـ Kelvin.

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}} \quad (17)$$

حيث N_1 , N_2 كثافات في السويات الطاقية العليا والدنيا لسويات استطاعة المضخم للريبوم ضمن الليف (عدد الذرات لكل وحدة حجم).

القيمة الدنيا لـ n_{sp} تتوافق مع حدوث انعكاس كامل للذرات حيث تكون $N_1=0$ (كل الذرات تثار إلى السوية العليا) وبالتالي $n_{sp}=1$ ، بينما $n_{sp}<1$ من أجل الانعكاس الاسكاني الجزئي.

2- تبعثر رايلي المزدوج ((Double Rayleigh Scattering (DRS)): يعود هذا التبعثر إلى عدم انتظام التركيب المجهرى للزجاج ويسبب كل منها تذبذبات في قرينة الانكسار بمقدار صغير وهذا يجعل الضوء يتبعثر بكيفية معروفة بتبعثر رايلي، والذي يفرض قيوداً عديدة في الأنظمة ذات المضخمات الضوئية، حيث تنعكس ASE المنتشرة بالاتجاه الخلفي وتنتشر بالاتجاه الأمامي بسبب تأثير DRS وتعرض لتضخيم بفعل تبعثر رامان المحثوث SRS نتيجة التفاعل بين الإشارة وجزيئات مادة الوسط حيث تقوم جزيئات المادة بامتصاص قدرة كافية لتحريض الاهتزازات الجزيئية وحدث انتقالات طاقية واصدار فوتونات جديدة ذات تردد يوافق تردد الإشارة المؤثرة فيحدث التضخيم، كما إن الانعكاسات المتعددة لـ ASE سوف تقلل نسبة الإشارة إلى الضجيج SNR وتدهور NF، علاوة على ذلك، فإن ASE والتداخل متعدد المسارات للإشارة الناتج عن DRS يؤدي إلى قيود على أداء النظام، إن DRS يتناسب مع طول الليف الضوئي والريح، لذلك فهو مهم في مضخمات رامان التي تتطلب استخدام ليف بطول يصل عدة كيلومترات.

3- زمن حياة قصير للسوية العليا (SUL): ينشأ SUL من زمن حياة السوية العليا القصير في تضخيم رامان يمكن أن يؤدي الريح العفوي إلى اقتران (انتقال) تغيرات المضخة إلى الإشارة.

4- تحريض الفونون الحراري (TPS): Temperature Phonon Stimulation (TPS): يظهر تأثير TPS في درجة حرارة الغرفة أو درجات حرارة مرتفعة، حيث يوجد مجموعة من الفونونات المحثوثة حرارياً في الزجاج، والتي يمكن أن تتعرض بشكل عفوي للريح من المضخات، مما ينتج عنه ضجيج إضافي للإشارات القريبة من الأطوال الموجية للمضخة. تعاني المضخمات الضوئية الليفية المشابهة بالريبوم EDFA أيضاً من الانبعاث العفوي للفوتونات الذي يضخم مع الإشارة المرسله، والذي يحد بشكل كبير من مسافة الإرسال، في EDFA يؤدي الانعكاس الاسكاني بين مستويين من مستويات طاقة أيون الإريبوم إلى التضخيم الضوئي من خلال عملية الانبعاث المحثوث. لكن يمكن لأيونات الإريبوم التي تشغل مستوى الطاقة العلوي أيضاً أن تقوم بانتقالات عفوية إلى السوية الأرضية وتصدر إشعاعات ويسمى الإشعاع الناتج الانبعاث العفوي المضخم، يعتبر الضجيج الموافق للانبعاث العفوي المضخم عامل محدد لتحديد قيمة نسبة الإشارة إلى

الضجيج في أي نظام يستخدم المضخمات الضوئية. من غير الممكن منع ضجيج المضخم لكن من الممكن تخفيضه باستخدام استطاعات ضخ منخفضة لكن ينخفض الانعكاس الاسكاني مع انخفاض ASE، ومن ثم ينخفض الريح. ينتقل هذا الإشعاع في الاتجاهين الأمامي والخلفي على طول الليف الضوئي، وتماثاً كما في الإشارة، يمكن أن يسبب الاتباع العفوي المتولد التضخيم في أي نقطة على طول الليف الضوئي كما انه ينتقل عبر الليف.

تعطى استطاعة P_{ASE} كما في العلاقة (16)، ويعطى NF وفق العلاقة: [25]

$$NF = \frac{P_{ASE}}{Ghv\Delta\nu_{sp}} + \frac{1}{G} \quad (18)$$

يمكن تعريف نسبة الإشارة إلى الضجيج الضوئية بأنها نسبة استطاعة الإشارة الضوئية إلى استطاعة الـ ASE.

$$OSNR = \frac{P_{out}}{P_{ASE}} = \frac{GP_{in}}{2n_{sp}h\nu B_0} \quad (19)$$

حيث P_{in} متوسط استطاعة دخل المضخم وهي حوالي نصف استطاعة الذروة للدخل.

من اجل EDFA يتم قياس تأثير ASE من خلال رقم الضجيج NF الذي يقدمه.

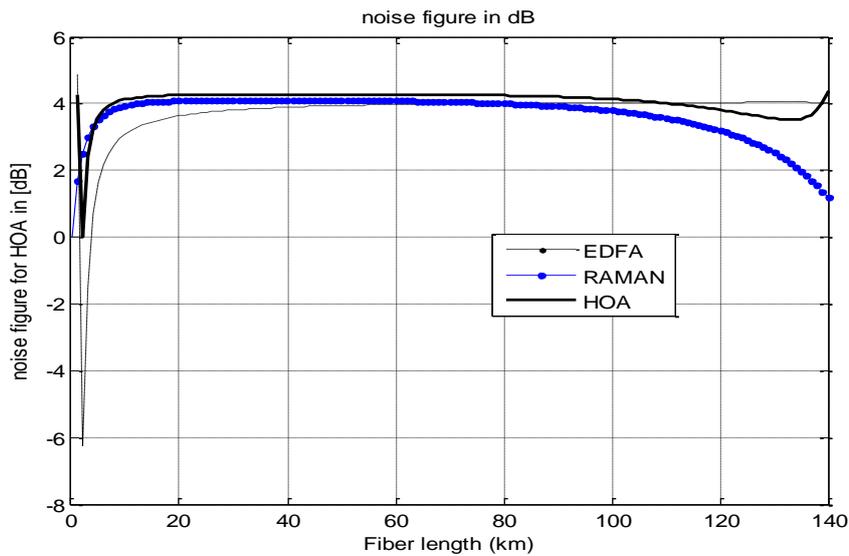
ولتوضيح تأثير طول الليف الضوئي المشاب بالاربيوم قمنا بنمذجة معادلات الضجيج باستخدام البرمجية MATLAB لاختبار أداء المضخم.

تعطى محصلة رقم الضجيج للمضخمات الموصولة على التتابع بالعلاقة التالية: [27]

$$NF_H = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} \quad (20)$$

يبين الشكل (9) علاقة رقم الضجيج للمضخم الهجين بطول الليف الضوئي من اجل استطاعة ضخ EDFA تتراوح بين (0.005mW-0.02mW) واستطاعة ضخ مضخم رامان 300mW.

أجريت الدراسة من اجل طول ليف ضوئي حتى 140km نلاحظ من الشكل ازدياد رقم الضجيج للمضخمات المدروسة مع تزايد طول الليف الضوئي، حيث كان سلوك المضخمات المدروسة متشابه، ووصلت قيمة رقم الضجيج حتى 3dB من اجل المضخم الهجين HOA، عند المسافة 10km على طول الليف. كما يتبين لنا من الشكل السابق أيضاً أن استخدام المضخم الهجين يساهم في تقليل رقم الضجيج الخاص بمضخم EDFA عند مسافة 120km، ومن أجل طول ليف 20km نجد أن قيمة $NF(HOA)=4.2dB$ ، $NF(RAMAN)=4dB$ ، $NF(EDFA)=3.6dB$.



الشكل (9) يبين تغير رقم الضجيج من اجل المضخمات EDFA, RAMAN, HOA مقابل طول الليف المستخدم

الجدول (3) ملخص نتائج لتقييم طيف ربح المضخم الهجين من اجل طول 5m لليف EDFA:

نوع المضخم	طول موجة الضخ [nm]	P_p [mW]	الربح [dB]	تموج الربح [dB]	رقم الضجيج [dB]
EDFA	980	100	20		3.6
RAMAN	1450	300	18		4
HYBRID	EDFA ($P_p = 120mW$) RAMAN forward pumping ($P_p = 300mW$)	100 300	25	1.42	4.2
HYBRID	EDFA ($P_p = 120mW$) + RAMAN (bidirectional pumping) ($P_p = 300mW$)	100 300	50	1.795	4.25
HYBRID	EDFA $P_p = 120mW$ and RAMAN/DCF ($P_p = 300m$) forward pumping	100 300	50	4.685	-
HYBRID	EDFA ($P_p=20mW$) and RAMAN/DCF ($P_p = 300mW$) bidirectional pumping	100 300	90	5.65	-

الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا في هذا البحث بتصميم مضخم ضوئي هجين مكون من مرحلتي تضخيم (RAMAN+EDFA) للعمل في الحزمتين C/ L، حيث استخدمت عدة تشكيلات ضخ وتم اختيار الأداء من اجل كل طريقة ضخ من حيث تسطح منحنى الربح وقيمة الربح وعرض الحزمة.

وتم التوصل في هذا البحث إلى عدة استنتاجات أساسية يمكن إيجازها كما يلي:

- حقق الضخ الثنائي أفضل النتائج من حيث الربح وعرض الحزمة حيث تم تحقيق ربح عالي 50dB على عرض حزمة عريض في حين لم يظهر تحسین في تموج الربح أو تسطح منحنى الربح.
- تم اختبار تأثير طول كل EDFA و RAMAN حيث تمت دراسة تأثير عدة أطوال لمضخم EDFA على منحنى طيف الربح، ووجدنا انه بزيادة طول الليف EDFA يزداد الربح وتموج الربح أيضاً في حال كون الليف الضوئي المستخدم أحادي النمط القياسي SMF، وعلى العكس يقل التموج بزيادة طول الليف الضوئي عند استخدام ليف DCF كمضخم رامان في المضخم الهجين.
- تم الحصول على ربح أعظمي 25dB وتموج ربح 1.42dB من اجل طول 5m لليف EDFA ووصل الربح حتى 58dB من اجل طول 12.5m والتموج 5.5dB من اجل حالة الضخ الأمامي لمضخم رامان.
- في حالة الضخ الثنائي ازداد الربح بشكل واضح ليأخذ القيم بين (50dB- 78dB) من اجل طول ليف مضخم EDFA يتراوح بين (5m- 12.5m) وتم تحقيق تسطح منحنى ربح يتراوح بين (1.795dB- 4.965dB) من اجل هذه الأطوال المدروسة.

- في حالة استخدام ليف DCF كمضخم رامان مع ضخه بشكل أمامي في تشكيلة المضخم الهجين ترافقت زيادة الريح مع زيادة في تموج الريح حيث كانت أعلى قيمة للريح 76dB من اجل طول 12.5m لمضخم EDFA في حين كان أفضل تسطح للمنحني من اجل طول 10m حيث كان التموج 2.95dB. أما في حالة الضخ الثنائي لمضخم رامان تجاوز الريح الاعظمي 100dB من اجل طول 12.5m للليف EDFA وأفضل تسطح 3.5dB عند نفس الطول.
 - لاحظنا زيادة رقم الضجيج مع زيادة طول الليف، وكانت قيمة NF هي الأعلى من اجل المضخم الهجين HOA مقارنة مع استخدام مضخم EDFA أو رامان بمفردهما حيث لاحظنا زيادة رقم الضجيج مع زيادة طول الليف المستخدم ووصلت قيمته إلى 4.2dB عند طول 10km ليثبت بعد ذلك على هذه القيمة مع زيادة الطول.
- التوصيات:**

- العمل على تحسين تسطح منحنى الريح وزيادة عرض الحزمة بدراسة بارامترات أخرى مثل زيادة عدد المضخات أو تقليلها للحصول على تسوية إضافية لمنحنى الريح.
- دراسة تشكيلات جديدة أخرى للمضخم الهجين بحيث يكون مضخمي EDFA, RAMAN موصولين على التوازي.

المراجع:

- [1] KAUR, R. , SINGH, S., *Pump Sharing Hybrid Optical Amplifier in The Scenario of C+L Band Dense Wavelength Division Multiplexed System*. An International Journal of Engineering Sciences, Vol. 17, January 2016, pp. 458-463.
- [2] SINGH, S., *Flat-Gain L-Band Raman-EDFA Hybrid Optical Amplifier for Dense Wavelength Division Multiplexed System*. IEEE, Vol. 25, No. 3, 2013, pp. 5337-5339.
- [3] AZAWE, M.I., *Low Noise C-Band EDFA/DRA Hybrid Amplifier Using the Same Pump Laser Diodes*. Photonics Letters of Poland, . IRAQ, Vol. 3 (4), 2011. pp. 165-167.
- [4] PARDEEP, K., DALJEET, S., *Performance Analysis of HOA in PI-DPSK DWDM System at Ultra Narrow Channel Spacings*. IJEEE, India, Vol. 2, Issue 3, 2015, 50-54.
- [5] SIMRANJIT, S., RAJINDER, S. K., *Review on Recent Developments in Hybrid Optical Amplifier for Dense Wavelength Division Multiplexed System*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Vol. 54(10), 2015, pp.1-12.
- [6] AIED K. M., *Performance Analysis of Designing a Hybrid Optical Amplifier (HOA) for 32 DWDM Channels in L-band by using EDFA and Raman Amplifier*. International Journal of Computer Applications, Vol. 149, No.8, 2016, pp.35-39.
- [7] MATHEUS O. L. BENINCA, MARIA J., *Design of a Wideband Hybrid EDFA with a Fiber Raman Amplifier*, IEEE, , 2011, pp.282-286.
- [8] SAIDIN, N.; TAIB, N. I. A., *Performance Configuration of Raman-EDFA Hybrid Optical Amplifier for WDM Applications*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 210. (2017) .
- [9] DEEPAK SH. *Design and Analysis of a Hybrid Optical Amplifier using EDFA and Raman Amplifier*, International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering ISSN: 2319-7463, Vol. 5 Issue 9, September-2016, pp.84-90.
- [10] IONESCU M. etc. *91 nm C+L Hybrid Distributed Raman-Erbium-Doped Fibre Amplifier for High Capacity Subsea Transmission*, Optical Networks Group, University College London, 2018, pp.1-3.
- [11] SHARMA, P., *Study of Single and Multi Wavelength(WDM) EDFA Gain Control Methods.*, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Vol.4, Issue5- May 2013, pp. 1424-1427.

- [12] OTHMAN, M.A.; ISMAIL, M.M.; Misran, M.H., *Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) for C-Band Optical Communication System*. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, Vol.12, No.04, 2012, pp. 48- 50.
- [13] BAGGA1, P., *Simulation Of 4×3 Gbits/Sec WDM System Based On Optical Amplifiers at 130km Transmission Distance.*, International Journal of Electronics and Communication Engineering (SSRG-IJECE), Vol. 2 issue 2, 2015, pp. 66-69.
- [14] KAUR, K., *Performance Analysis of 16-Channel WDM System Using Erbium Doped Fiber Amplifier.*, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 3, Issue 6, December 2013, pp. 181-184.
- [15] PAREKHAN, M., *Design Optimization for Efficient Erbium-Doped Fiber Amplifiers.*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Science Index Vol.2, No.10, 2008, pp. 36-39.
- [16] MISHAL, S.; SANJIV, K., *Comparative Analysis of EDFA based 64 channel WDM systems for different pumping techniques*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 5, Issue 6, June-2014, pp.66-69.
- [17] BANDHOPADHYA1, T. K.; MANISH, S., AKASH, T., *Gain Equalization of EDFA*. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE) Vol. 3, Issue 1, February 2013, pp.21-24.
- [18] MUHAMMAD, S., *Design and Optimization of an Erbium Doped Fiber Amplifier in Amplified Lightwave System*. J. Eng. & Tech. Vol. 1(2), 2011, pp.137-140.
- [19] MOHAMMED, N. I., *Raman Amplifiers for Telecommunication 1*, Springer Series in optical sciences, Springer-Verlag New York, Inc, 2004, 331.
- [20] ARWA, H. B., *Different Pump Configurations for Discrete Raman Amplifier*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 2, Issue 11, 2011, 1-5.
- [21] SIMRANJIT, S.; KALER, R.S., *Multistage gain-flattened hybrid optical amplifier at reduced wavelength spacing*. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, Vol.18, 2014, pp. pp.5357-5359.
- [22] KARTHICK, J.; SANJAI,V., *Transmission of NG-PON for Long Haul Networks Using Hybrid Amplifier*, National Conference on Emerging Technologies for Sustainable Engineering & Management (NCETSEM'18)-2018, 1-7.
- [23] THYAGARAJAN, K. J., *A novel design of an intrinsically gain flattened erbium doped fiber*. Optics communications 183, no. 5, 2000, pp. 407-413.
- [24] YUGNANDA, M., *Performance of Hybrid Optical Amplifier and Conventional Optical Amplifier in the Scenario of Long Haul Ultra-DWDM System*. Proceedings of the World Congress on Engineering, London, 2015, 17-20 .
- [25] ÇOKRAK, A. C.; AHMET, A., *Gain and Noise Figure Performance of Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA)*. Istanbul University Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol.(4), No. (2), 2004, 1111-1122.
- [26] AHMED, H. T., *Gain and Noise Performance of Fiber Raman Amplifiers*. International Computer Engineering Conference, Cairo University, 2009, .
- [27] RAMANPREET, K.; KIRANDEEP, K., *Analysis and Investigation of Noise Figure of Fiber Raman Amplifier*. International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, 2012, 5.