

نمذجة ومحاكاة وسط ربح ليفي

د. عفيف صقور *

د. نظير ديوب **

د. جمال سعيد ***

علي حسن ****

(تاريخ الإيداع 10 / 1 / 2021. قُبل للنشر في 13 / 6 / 2021)

□ ملخص □

تعتبر مسألة تصميم وتصنيع منابع ليزيرية في غاية الأهمية من أجل تطبيقات متعددة كالحساسات والتحليل الطيفي والتطبيقات الصناعية وتطبيقات الاتصالات الضوئية. لهذه الأخيرة خصوصية لأهميتها، حيث تركز الأبحاث على تصميم منابع ليزيرية بمواصفات محددة تتوافق ومتطلبات تقنية التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية (Wavelength Division Multiplexing - WDM) التي تشكل أساس تطوير وتحسين أداء الشبكات الضوئية. فقد شكل ظهور الألياف الضوئية وتطورها السريع في الخصائص والنوعية وإمكانية استخدامها كوسط تضخيم منعطفاً في مجال الليزر الصلبة، وأدى ذلك التطور إلى ظهور مجال بحثي هام جداً هو مجال الليزر الليفية التي تستخدم الليف الضوئي وحيد النمط كوسط تضخيم.

يهدف ويركز البحث على اقتراح طريقة للوصول إلى جملة خصائص وسط ربح صلب ليفي ما(مصمم أو معتمد صناعياً). تعتمد تقنية تحقيق هدف البحث على استخدام برنامج OptiSystem المستخدم عالمياً في المجالين البحثي والصناعي بالإضافة لاستخدام برنامج MATLAB في عملية محاكاة مساعدة للحصول على المنحنيات البيانية، ذلك بترحيل البيانات المستخلصة من المحاكاة OptiSystem إلى برنامج MATLAB. يتم في هذا البحث دراسة نوع واحد من الألياف الضوئية وهو ليف وحيد النمط قياسي، ليكن هناك إمكانية لتعميم البحث لإيجاد خصائص الليف المستخدم.

نستطيع بتطبيق المحاكاة المقترحة التوصل إلى خصائص وسط الربح الليفية ومن أهمها: ربح الوسط بتابعية طول الموجة عند استطاعات ضخ مختلفة وأطوال مختلفة للليف الضوئي المدروس. وقد تم اقتراح طريقة جديدة للحصول على منحنى الاصدار التلقائي المضخم (Amplified Spontaneous Emission-ASE)، يتلخص ذلك بأن يوضع الليف ضمن حلقة تضم مرشح ضوئي صرف عرض نطاقه يساوي على الأقل عرض نطاق الإصدار لوسط التضخيم المشاب بعناصر أرضية نادرة مثل (Er^{+3}) حيث تم تنفيذ المحاكاة باستخدام برنامج OptiSystem ومقارنة صحة النتائج بدراسات مرجعية.

الكلمات المفتاحية: ليزر ليفي - التجميع بتقسيم طول الموجة - ليف ضوئي وحيد النمط - مضخم ضوئي.

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

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

*** أستاذ - مركز الدراسات والبحوث العلمية - سورية.

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

Modeling and Simulation of Fiber Gain Medium

Dr. Afif Sakkour *
Dr. Nazir Dayoub **
Dr. Jamal Said ***
Ali Hasn ****

(Received 10 / 1 / 2021. Accepted 13 / 6 / 2021)

□ ABSTRACT □

The design and manufacture of laser sources is extremely important for a wide variety of applications such as sensors, spectroscopy, industrial and optical communications applications. The latter has a peculiarity of its importance, as research focuses on designing laser sources with specific specifications that meet the requirements of Wavelength Division Multiplexing - WDM, which forms the backbone for developing and improving the performance of optical networks. The emergence of optical fibers and their rapid development in properties, qualities and the possibility using them as an amplification medium constituted a turning point in the field of solid lasers. This development led to the emergence of a very important field of research: the field of fiber lasers that use single-mode optical fibers as an amplification medium.

The research aims and focuses on proposing ways to reach a set of characteristics of a solid fibers gain medium (designed or artificially approved). The technique of achieving the research objective is based on the use of the OptiSystem program, which is used worldwide in both the research and industrial fields, in addition to using the MATLAB program in an assisted simulation process by receiving its data from the OptiSystem simulator. In this research, one type of optical fiber is studied, which is a standard single-mode fiber, but there is the possibility of generalizing the research to arrive at the characteristics of any type of fiber used.

By applying the proposed simulation, we can arrive at the properties of the fiber gain medium, most important is the gain of the medium as a function of the wavelength for different pumping powers and different lengths of the studied optical fiber. A new method has been proposed for obtaining the Amplified Spontaneous Emission-ASE, that is to place the fiber within a loop comprising an optical filter whose bandwidth is at least equal to the emission bandwidth of the amplification medium similar to rare earth elements like Er^{+3} where the simulation was carried out using OptiSystem software and the validity of the results was compared with reference studies.

Keywords: Fiber Laser-Wavelength Division Multiplexing (WDM) - Optical Amplifier - Single Mode Fiber (SMF).

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

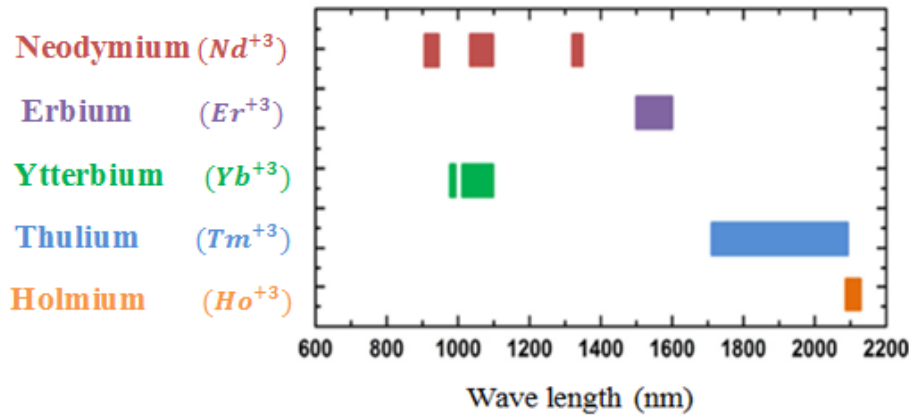
** Associate Professor -Department of physics-Faculty Sciences-Tishreen University-Lattakia-Syria.

*** Professor- Research Director - Center of Scientific Studies and Research - Syria.

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

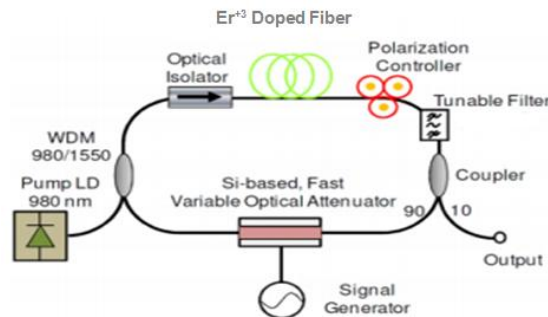
مقدمة:

تعتبر عملية تصميم وتصنيع منابع ليزرية في غاية الأهمية من أجل تطبيقات متعددة كالحساسات والتحليل الطيفي والتطبيقات الصناعية وفي مجال الاتصالات الضوئية تأخذ أهمية خاصة [1-5]. تركز الأبحاث والدراسات حالياً - ضمن حقل الإتصالات الضوئية - على نظام التجميع بتقسيم طول الموجة الضوئية لما له من أهمية خاصة في تطوير شبكات الإتصالات العالمية عبر زيادة معدلات النقل التي يمكن أن تبلغ عدة (Tbit/s) ضمن ليف ضوئي واحد [6,7]. شكل ظهور الألياف الضوئية وتطورها السريع في الخصائص والنوعية واقتراح استخدامها كوسط تضخيم منعطفاً مهماً في حقل الليزرزات الليفية ومحور بحثي هام جداً في هذا المجال. حيث تتميز ليزرات الألياف الضوئية بإمكانية الحصول على عامل تضخيم للإشارة الضوئية ضمن مجال طيفي واسع وبحسب شاردة الإشابة المستخدمة [8,9]. يبين الشكل (1) اختلاف شاردة الإشابة باختلاف التطبيق المرغوب، بدءاً من تطبيقات معالجة المواد حتى تطبيقات الإتصالات الضوئية عند الإشابة بشاردة (Er^{+3}).



الشكل(1): تغير الطول الموجي بتغير شاردة الإشابة.

يتكون الليزر الليفي من حلقة تضم وسط التضخيم الصلب (الليف الضوئي المشاب بعناصر أرضية نادرة) ومن عناصر بصرية ملحقة للتحكم باستطاعة الإشارة الضوئية واستقطابها ومن مرشح ضوئي قابل للتوليف. يُضخ الليف المشاب بمنبع ضخ مناسب طوله الموجي λ_p واستطاعته P_p محددين بدقة [10]. الشكل(2).



الشكل(2): منظومة ليزرية ليفية.

أهمية البحث وأهدافه:

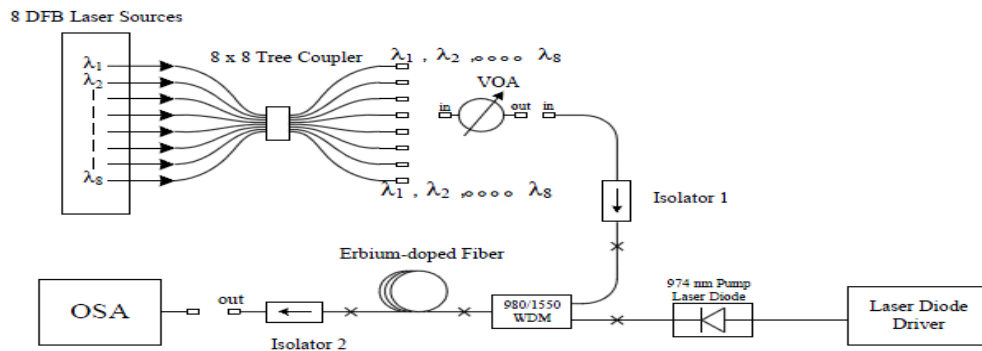
تعتبر عملية إيجاد خصائص وسط ربح ليفي مهمة جداً لفهم آلية توليد الحامل الضوئي المناسب (الليزر) وإنتاجه بمواصفات محددة مطابقة لتوصيات اللجنة الدولية للاتصالات، أو أيضاً إنتاج منابع ضوئية عند أطوال موجية محددة فقط مثل ($\lambda = 1530 \text{ nm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$) بهدف اختبار جودة الألياف الضوئية قبل تسويقها تجارياً وأثناء عملية التركيب في الشبكات طويلة المسافات، ونسعى في هذا البحث إلى توضيح آلية الوصول إلى خصائص وسط الربح الليفي واقتراح الطرق المناسبة لذلك.

طرائق البحث ومواده:

اعتمد البحث على المحاكى OptiSystem المعتمد بحثياً وصناعياً وعلى استخدام ماتلاب في عملية محاكاة مساعدة حيث تمت كتابة القيم العددية (الأكواد) للحصول على خصائص وسط الربح الليفي المدروس علماً أنّ البرامج المكتوبة بالماتلاب تغذى بالمعطيات من برنامج المحاكاة OptiSystem .

1- مضخم ليفي مشاب بالإربيوم EDFA:

سنهتم في هذا البحث باستخدام ليف مشاب بالإربيوم كوسط ربح لمضخم ضوئي يعمل ضمن نافذة الاتصالات الموسعة C-Band. تعتبر هذه المضخمات أساس أنظمة التقسيم بالتجميع للطول الموجي في الاتصالات الضوئية، والمسؤولة إلى حد كبير عن الزيادة الكبيرة في العرض الترددي للإنترنت (عرض عصابة النقل) في العقدتين الماضيتين. لم يبدأ استكشاف هذا العرض الترددي إلا بعد أن أتاحت EDFA التضخيم المتزامن للعديد من قنوات WDM باستخدام الأمواج الضوئية. وبالتالي الاستغناء عن المكررات الكهربائية عالية الكلفة، ويبين الشكل (3) مخطط عام لمنظومة EDFA المكونة من: ليف ضوئي مشاب بالإربيوم - مضخة ليزيرية - منبع إشارة متعدد الطول الموجي - قارن طول موجة انتقائي (WDM)

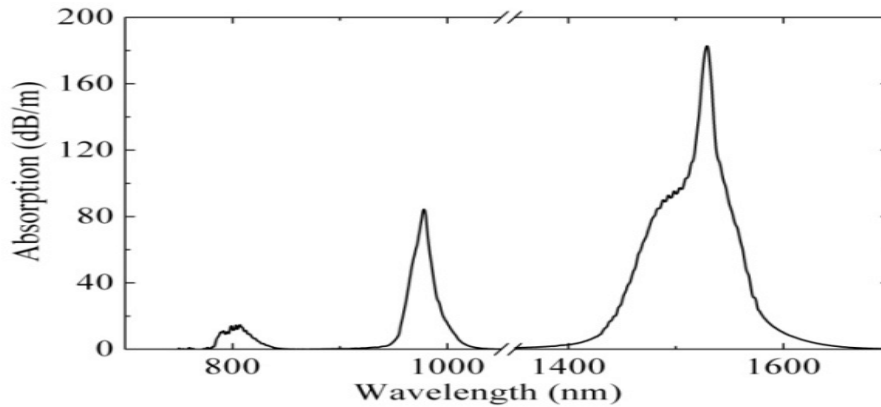


الشكل (3): مخطط تجربة مضخم ليفي متعدد الطول الموجي مكون من: تغذية خلفية موزعة DFB، موهن ضوئي قابل للتوليف VOA، مجمع بصري 980/1550 WDM، محلل طيف ضوئي OSA.

أدى زيادة الاهتمام بمنظومة EDFA إلى توفر سريع لديودات الضخ ذات وثوقية عالية لاستخدامها في صناعة أنظمة الاتصالات. إضافة إلى تطوير أجهزة هامة أخرى مثل العوازل. أدت هذه العوامل إلى توافر ألياف مشابة بالإربيوم تجارية مدمجة [11-12] بعد بضع سنوات من الورقة البحثية الأولى وهو رقم قياسي في تطور التكنولوجيا. تجدر الإشارة هنا إلى أن جودة أداء المضخم الليفي ترتبط بشكل مباشر بتركيز الإشابة [13].

• مطيافية شاردة الإربيوم Er^{+3} :

يظهر الشكل (4) مخطط امتصاص شاردة الإربيوم في ألياف السيليكا.

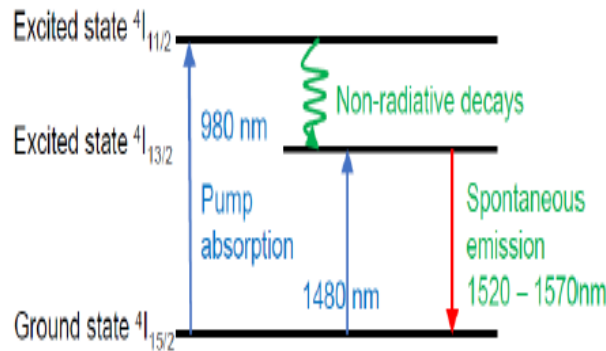


الشكل (4): طيف امتصاص الإربيوم.

يزودنا الإنتقال بين $I_{15/2}^4, I_{13/2}^4$ بربح عند نافذة الإرسال $1550nm$ في ألياف السيليكا. معظم امتصاصية السوية الأرضية تستخدم لضخ EDFA. عمر السوية العليا $I_{13/2}^4$ في السيليكا المشابة $10 ms$. هذا العمر الطويل ناتج بشكل رئيسي عن فاصل الطاقة الكبير بين $I_{15/2}^4, I_{13/2}^4$ والذي يؤدي إلى معدل انتقال لا إشعاعي صغير.

عند الضخ بليزر طول موجته $980 nm$ ، تثار شاردة Er^{+3} إلى $I_{11/2}^4$ وتعود بشكل سريع إلى $I_{13/2}^4$ بسبب فاصل الطاقة الصغير بينهما، علماً أن عمر السوية $I_{11/2}^4$ في السيليكا المشابة يساوي تقريباً $7\mu s$. هناك عدد كبير من سويات ستارك المتقاربة في السويات المتعددة $I_{15/2}^4, I_{13/2}^4$. تحوي السوية $I_{15/2}^4$ على 8 سويات ستارك بينما تحوي السوية $I_{13/2}^4$ على 7 سويات ستارك منفصلة [15,14].

يتم حالياً ضخ EDFA بطولين موجيين هما الأكثر شيوعاً $980 nm$ إلى السوية $I_{11/2}^4$ و $1480 nm$ إلى السوية $I_{13/2}^4$ شكل (5). أجريت الدراسات المبكرة على EDFA باستخدام ليزر Ar^{+} كمضخة في المجال المرئي وليزر Ti:Sapphire عند $800 nm$. توافرت بعد ذلك ديودات ضخ في المجال $800 nm$ نتيجة الجهود التي بذلت لتطوير أجهزة الإرسال لنافذة الاتصالات الأولى. رغم ذلك كان امتصاص الضخ عند $800 nm$ صغير كما يلاحظ في الشكل (4) مما جعلها أقل جاذبية مقارنة باستخدام أطوال موجة الضخ $980 nm$ و $1480 nm$ [10].



الشكل (5): سويات الطاقة للإربيوم.

• الإصدار التلقائي المضخم:

يمكن لكل الشوارد الإسترخاء بشكل تلقائي من السوية العليا إلى السوية السفلى بإصدار فوتون غير مترابط مع فوتون الإشارة. يتضخم هذا الفوتون المنبعث تلقائياً بمجرد مروره عبر الليف، ويقوم بدوره على حث إصدار المزيد من الفوتونات من الشوارد المثارة.

تحدث هذه العملية الطبيعية عند أي تردد ضمن طيف الفلورة لانتقالات التضخيم. نشير إلى أن هذه العملية تتم وفق الإصدار التلقائي المضخم ASE ، الذي يمكن أن أن يشبع قوة المضخة وتحد من الكمية الكلية لربح الإشارة المتاحة ضمن المضخم، لذلك فهو ينقص (OSNR) والذي يعتبر معلمة (بارامتر) هامة في أنظمة الإرسال لمسافات طويلة.

المكون الرئيسي لإستطاعة ASE هو استطاعة الضجيج المحلية التي يتم تحديدها بأنها الإستطاعة المتولدة في نقطة من الليف المشاب بالإصدار التلقائي عند تردد ν ضمن عصابة $\Delta\nu$ وتعطى بالعلاقة التالية:

$$P_0^{ASE} = 2h\nu\Delta\nu \quad (1)$$

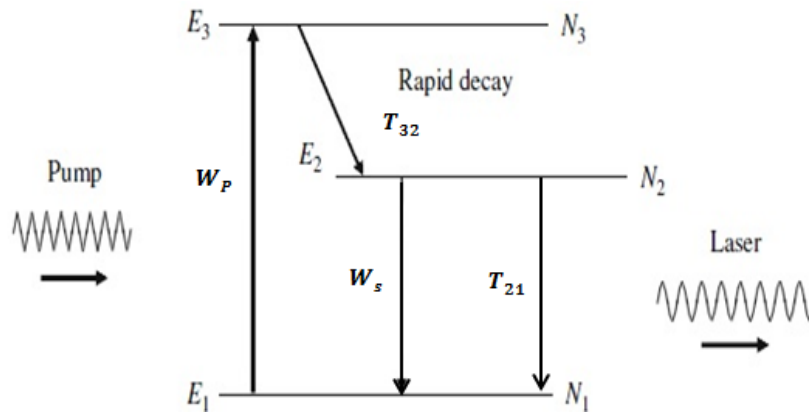
فتكون استطاعة ASE الكلية عند نقطة Z على طول الليف هي مجموع استطاعة ASE من القسم السابق من الليف مضافاً إليها استطاعة الضجيج المحلية [16].

2- نمذجة EDFA:

لنمذجة EDFA سنقوم بداية بدراسة أساسيات النظام الذري ثلاثي السويات، يهدف هذا النظام إلى تسليط الضوء على جزء من البنية الطاقية لشاردة الإربيوم Er^{+3} . لدراسة سلوك مثل هذا النظام يجب الوصول إلى معادلات المعدل التي تربط مختلف العمليات التي تحدث (إصدار تلقائي، إصدار محثوث، الضخ) بإسكان السويات [18,17,10].

• معادلات المعدل:

يوضح الشكل (6) نظام ليزري ثلاثي المستوى والذي يعتبر نموذج قياسي لمنظومة EDFA.



الشكل (6): نظام ذري ثلاثي السويات.

السوية الأولى هي السوية الأرضية والثالثة السوية المثارة ذات العمر القصير أو سوية الضخ والثانية السوية الشبة مستقرة التي زمن حياتها τ . نرمز لإسكان السويات (1,2,3) بـ N_1, N_2, N_3 على التوالي. تعتبر السوية 2 هي السوية العليا للتضخيم والسوية 1 هي السوية الأرضية للتضخيم.

W_p معدل الانتقال المحثوث للضخ بين 1 و 3 ، W_s معدل الانتقال المحثوث للإشارة بين 2 و 1 ، T_{32} معدل الانتقال التلقائي بين 3 و 2 ، T_{21} معدل الانتقال التلقائي بين 2 و 1 . حيث:

$$T_{32} = A_{32} + S_{32} \quad , \quad T_{21} = A_{21} + S_{21} \quad , \quad N = N_1 + N_2 + N_3$$

يرمز σ_p للمقطع العرضي للضخ من السوية 1 إلى 3 و σ_s للمقطع العرضي للإشارة من السوية 2 إلى 1 . نكتب معادلات المعدل بدلالة المقاطع العرضية للإشارة والمضخة وكثافة تدفق الفوتونات:

$$\frac{dN_3}{dt} = \sigma_p \phi_P (N_1 - N_3) - T_{32} N_3 \quad (a-2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_s \phi_s (N_1 - N_2) + T_{32} N_3 - T_{21} N_2 \quad (b-2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \sigma_p \phi_P (N_3 - N_1) + \sigma_s \phi_s (N_2 - N_1) + T_{21} N_2 \quad (c-2)$$

حيث: $W_p = \sigma_p \phi_P$, $W_s = \sigma_s \phi_s$

وفي الحالة المستقرة يكون:

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_1}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$N_3 = \frac{W_p}{W_p + T_{32}} N_1, \quad N_2 = \frac{W_s(W_p + T_{32}) + W_p T_{32}}{(W_p + T_{32})(W_s + T_{21})} N_1$$

نحصل على علاقة قلب الإسكان التالية:

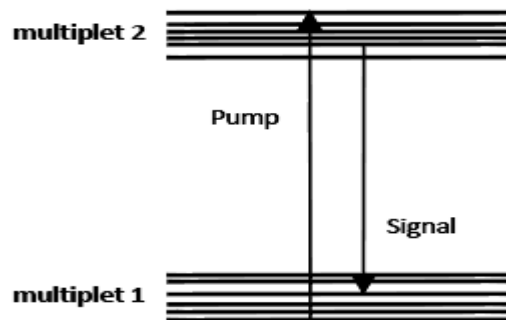
$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{(W_p - T_{21})/(W_p + T_{21})}{\left[1 + \frac{3W_p + 2T_{32}}{T_{32}(W_p + T_{21})} W_s\right]} \quad (4)$$

• النظام ثنائي المستويات:

لوضع نموذج للخصائص الأساسية لمنظومة EDFA يتم تخفيض النظام ثلاثي السويات إلى ثنائي السويات باعتبار أن سوية الضخ العليا والسوية العليا شبه المستقرة تنتمي إلى نفس السوية، مع الأخذ بالحسبان أن $T_{21} = A_{21}$. حيث أن معدل التحلل من السوية الثالثة كبير جداً لذلك نعتبر قيمة إسكان هذه السوية تقريباً يساوي الصفر فتصبح علاقة قلب الإسكان:

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{W_p - T_{21}}{W_p + 2W_s + T_{21}} \quad (5)$$

ينعكس هذا التقريب على معادلات المعدل وبشكل خاص السوية N_2 حيث يصبح لدينا حد إضافي يأتي من كون أن الضخ يتم بشكل مباشر إلى السوية N_2 الشكل (7).



الشكل (7): يمثل نظام ثنائي السويات

نكتب معادلات المعدل في حالة نظام بمستويي طاقة كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_s \phi_s (N_1 - N_2) + \sigma_p \phi_P (N_1 - N_2) - A_{21} N_2 \quad (a-6)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \sigma_s \phi_s (N_2 - N_1) + \sigma_p \phi_P (N_2 - N_1) + A_{21} N_2 \quad (b-6)$$

وبالتالي نكتب علاقة المعدل العامة لسوية التضخيم كما يلي:

$$\frac{dN_2(r, \phi, z)}{dt} = \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{v_k}^a}{h\nu_k} N_1(r, \phi, z) - \sum_k \frac{P_k i_k \sigma_{v_k}^e}{h\nu_k} N_2(r, \phi, z) - \frac{N_2(r, \phi, z)}{\tau} \quad (7)$$

حيث k دليل يرمز للشعاع الضوئي (p, s, ASE) ، و $\sigma_{v_k}^a$ المقطع العرضي للامتصاص عند التردد ν_k ، $\sigma_{v_k}^e$ المقطع العرضي للإصدار عند التردد ν_k ، و i_k الشدة المنظمة - التي تعبر عن مقدار الشدة الضوئية الكائنة ضمن النمط الضوئي الخاص بالليف - وتعطى بالعلاقة:

$$i_k(r, \phi) = \frac{1}{\pi w^2} e^{-\frac{r^2}{w^2}} \quad (8)$$

ونحصل في الحالة المستقرة من العلاقة (10) على العلاقة العامة لإسكان سوية التضخيم:

$$N_2(r, \phi, z) = \frac{\sum_k \frac{\tau \sigma_{v_k}^a}{h\nu_k} P_k i_k}{1 + \sum_k \tau \frac{(\sigma_{v_k}^a + \sigma_{v_k}^e)}{h\nu_k} P_k i_k} N(r, \phi, z) \quad (9)$$

حيث: $N(r, \phi, z) = N_1(r, \phi, z) + N_2(r, \phi, z)$

تصف معادلات الانتشار التفاعلات التي تحدث خلال انتشار موجة الإشارة والمضخة مع الشاردة المتوزعة 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:

$$\begin{aligned} \frac{dP_k(z)}{dz} = & u_k \sigma_{v_k}^e \int_0^{2\pi} \int_0^a i_k(r, \phi) N_2(r, \phi, z) r dr d\phi (P_k(z) + m h \nu_k \Delta \nu_k) \\ & - u_k \sigma_{v_k}^a \int_0^{2\pi} \int_0^a i_k(r, \phi) N_1(r, \phi, z) r dr d\phi P_k(z) + \alpha_k P_k(z) \end{aligned} \quad (10)$$

حيث: $I_k(r, \phi, z) = i_k(r, \phi) P_k(z)$

بما أننا نتحدث عن ألياف ضوئية وحيدة النمط لابد من تنظيم الشدة في المستوي العرضي وفق ما يسمى بمعامل التداخل والذي يعبر عن تداخل نمط الشدة الضوئية المنقلة عبر الليف من النمط الضوئي الخاص بالليف. وبإدخال معامل التداخل المنظم وفق العلاقة: $\Gamma_k = \int_0^{2\pi} \int_0^a i_k(r, \phi) r dr d\phi = 1$. فتكون علاقة معامل التداخل ضمن الليف الضوئي:

$$\Gamma_k = \int_0^{2\pi} \int_0^a i_k(r, \phi) r dr d\phi = 1 - e^{-\frac{a^2}{w^2}} \quad (11)$$

وباعتبار التركيز ثابت في المستوي العرضي للليف تصبح العلاقات (7) و (9) و (10) كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sum_k \frac{\sigma_{v_k}^a \Gamma_k P_k}{A h \nu_k} N_1 - \sum_k \frac{\sigma_{v_k}^e \Gamma_k P_k}{A h \nu_k} N_2 - \frac{N_2}{\tau} \quad (12)$$

ومنه:

$$N_2 = \frac{\sum_k \frac{\tau \sigma_{v_k}^a P_k \Gamma_k}{Ahv_k}}{1 + \sum_k \tau \frac{(\sigma_{v_k}^a + \sigma_{v_k}^e)}{Ahv_k} P_k \Gamma_k} N \quad (13)$$

ومنه:

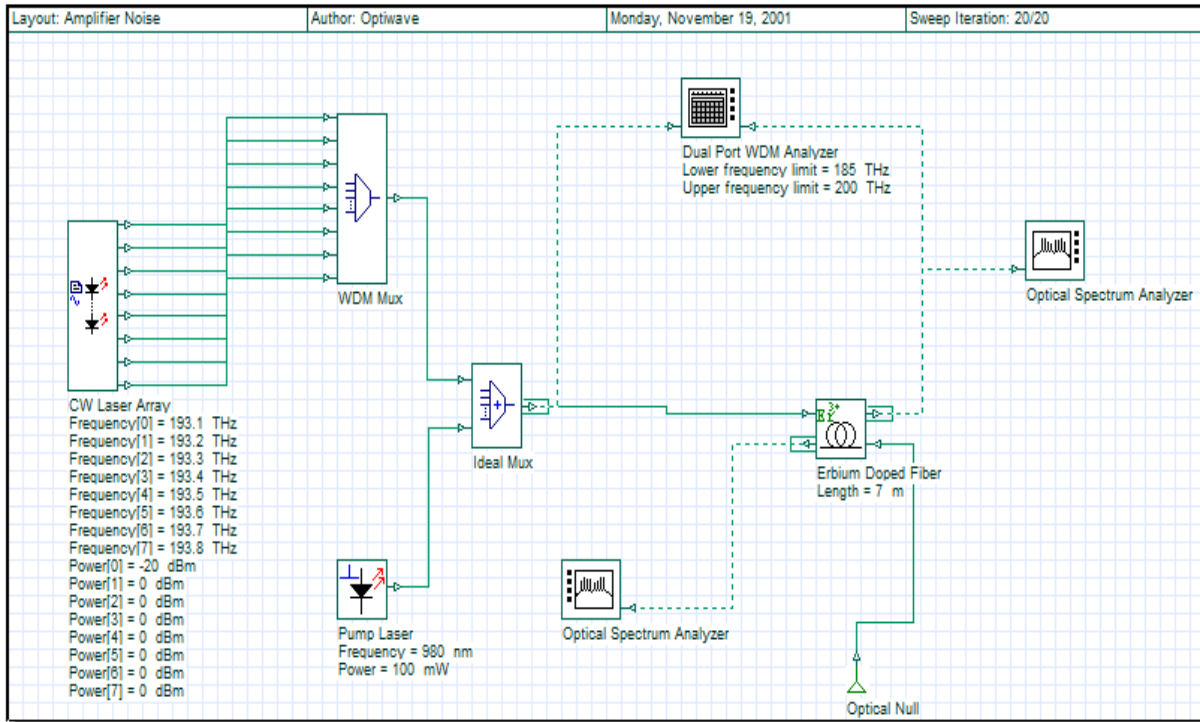
$$\frac{dP_k(z)}{dz} = u_k(P_k(z) + m h v_k \Delta v_k) N_2 \Gamma_k \sigma_{v_k}^e - u_k \Gamma_k P_k(z) \sigma_{v_k}^a N_1 - u_k \alpha_k P_k(z) \quad (14)$$

u_k تحدد جهة انتشار الشعاع: $u_k = 1$ انتشار أمامي ، انتشار خلفي $u_k = -1$

النتائج والمناقشة:

أولاً: دراسة تغيرات الربح:

يبين الشكل (8) الدارة البصرية لاختبار وسط الربح الليفي حيث يتم ضخ وسط الربح بإشارة ضخ عند الطول الموجي 980 nm باستطاعة مضخة $P_p = 100 \text{ mW}$ ويطبق بنفس الوقت إشارات استطاعة كل منها $P_p = -20 \text{ dBm}$ يقع ترددها ضمن طيف إصدار شاردة الإربيوم . تجمع إشارة الضخ والإشارات المطلوب تضخيمها بتطبيق مجمع بصري على وسط الربح. نحصل على الربح على كل قناة باستخدام محلل طيفي WDM متاح في مكتبة برنامج OptiSystem ثنائي المدخل ويبين الجدول (1) المعلمات التصميمية لوسط الربح والجدول (2) قيم الربح لجهاز WDM من أجل ثمانية إشارات دخل.

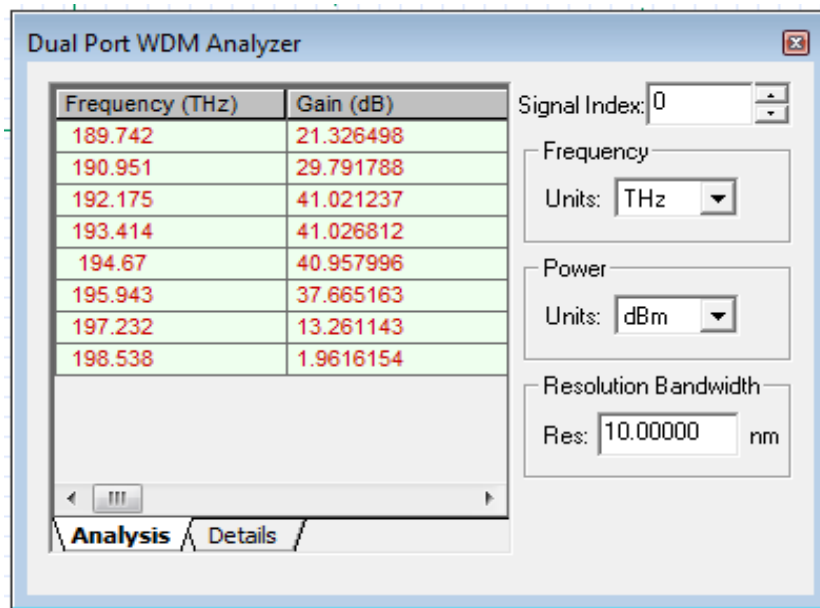


الشكل (8): الدارة البصرية لاختبار وسط الربح.

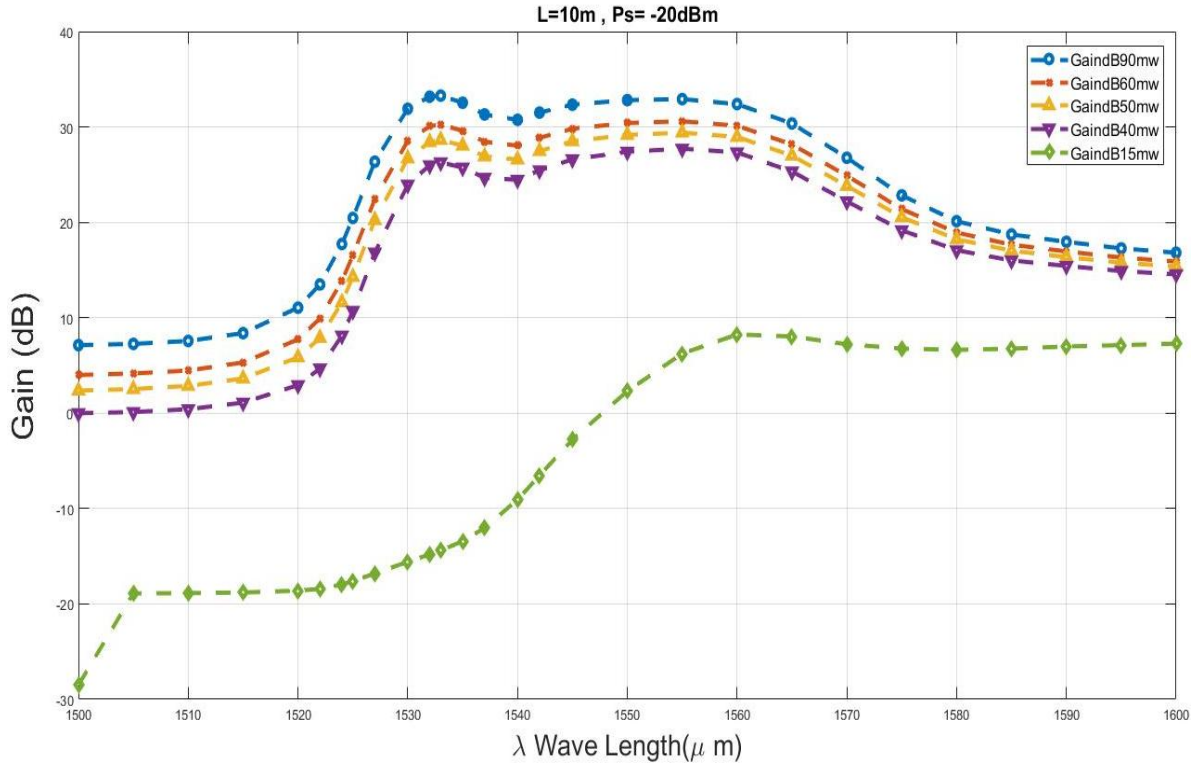
الجدول(1): المعلمات التصميمية.

طول وسط الريح	L	3m ,5m ,7m ,10m
زمن حياة السوية العليا	τ	10 ms
تردد فوتون موجة الضخ	ν_p	306.12 THz
مساحة المقطع العرضي لوسط الريح	A	$0.15197 \mu m^2$
كثافة شوارد Er^{+3}	N_t	$10^{25} ion/m^3$
نصف قطر وسط الريح	R	$2.2 \mu m$
فتحة النفوذ العددية	N_a	0.24

الجدول(2): نتائج محلل الطيف WDM.

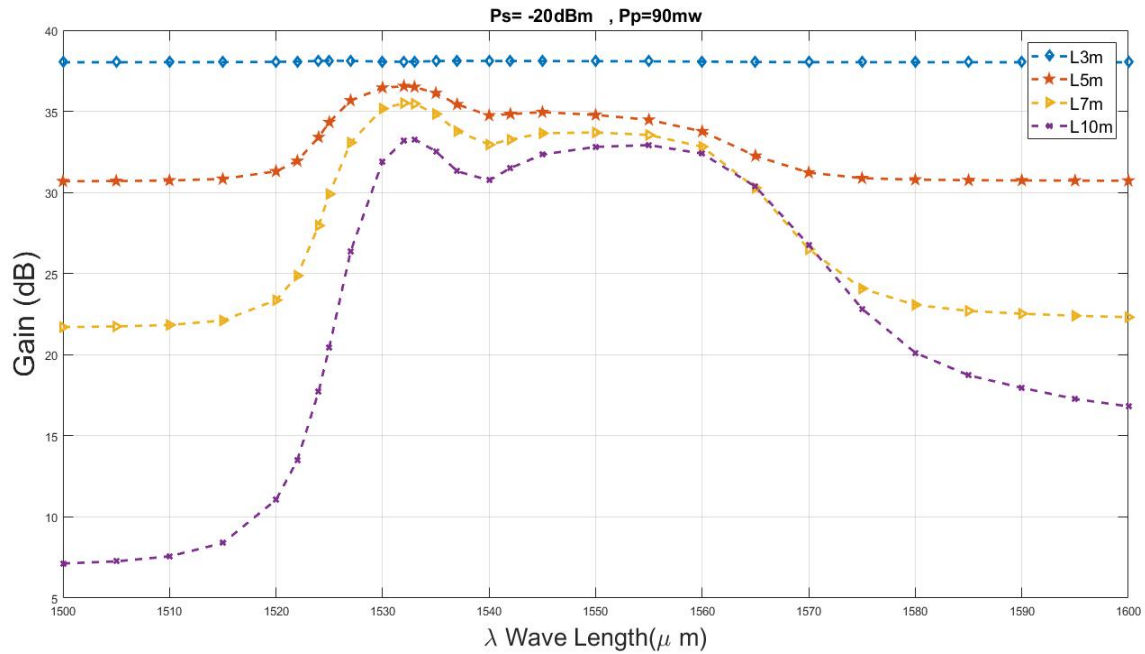


- لا يتيح برنامج OptiSystem تنضيد منحنيات في نفس النافذة لذلك تم الاستعانة ببرنامج ماتلاب وترحيل قيم الريح إلى برنامج ماتلاب للحصول على منحنيات الريح $G(\lambda)$ من أجل عدة حالات لاستطاعة المضخة.
- منحنى الريح بتأبعية طول موجة الإشارة عند استطاعات إشارة ضخ مختلفة من أجل ليف EDFA طوله 10 m بتركيب إشابة ($Er: GeO_2 - SiO_2$) الموضح في الشكل(9).



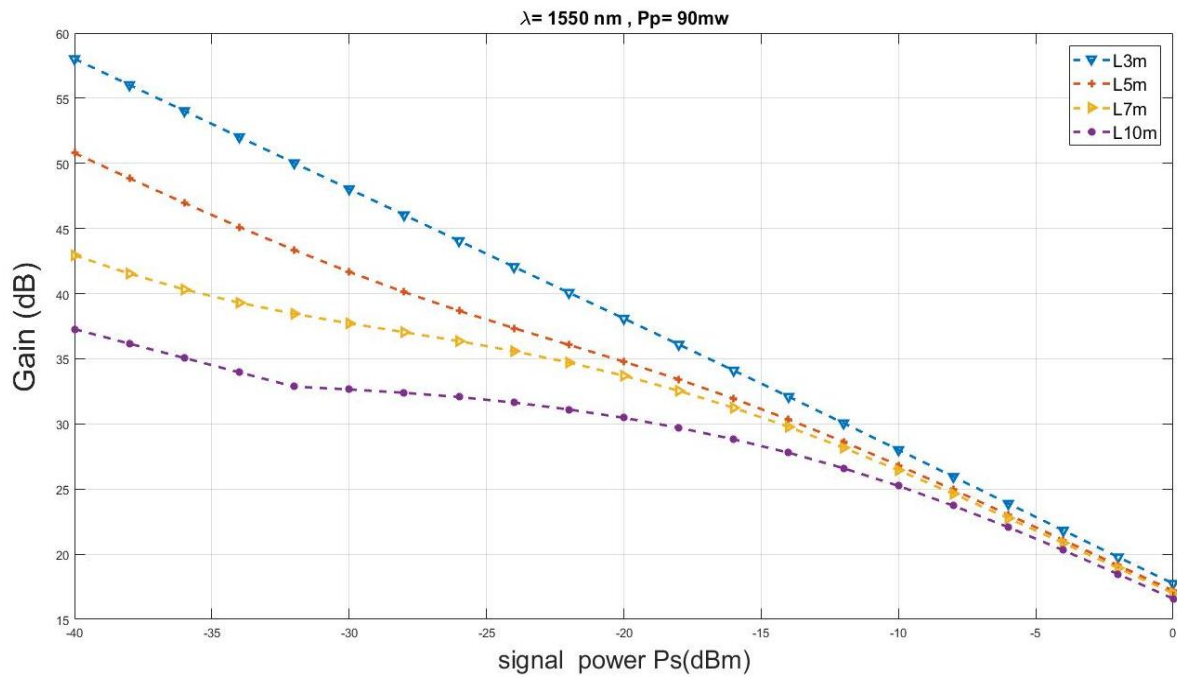
الشكل(9): تزداد قيمة الربح بزيادة استطاعة إشارة الضخ.

- منحنى الربح بتابعية طول موجة الإشارة من أجل عدة أطوال لوسط الربح بإستطاعة إشارة دخل (-20dBm) الموضح في الشكل (10):



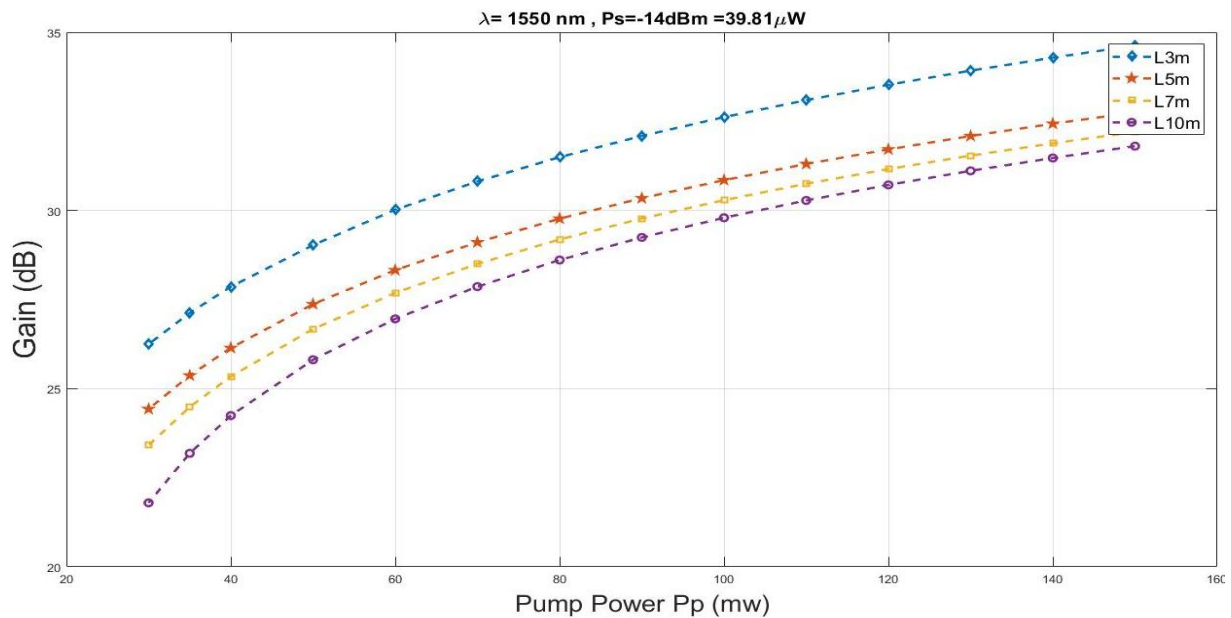
الشكل(10): تزداد قيمة الربح بزيادة طول وسط الربح حتى الطول الأمثل الذي يوافق ربح إشارة دخل تعطي استطاعة خرج أقل من قوة الإشباع.

- منحنى الربح بتابعية استطاعة إشارة الدخل عند الطول الموجي 1550 nm من أجل عدة أطوال لوسط الربح باستطاعة إشارة ضخ ثابتة $P_p = 90\text{ mW}$ الموضح في الشكل (11):



الشكل(11): تقل قيمة الربح بزيادة استطاعة إشارة الدخل.

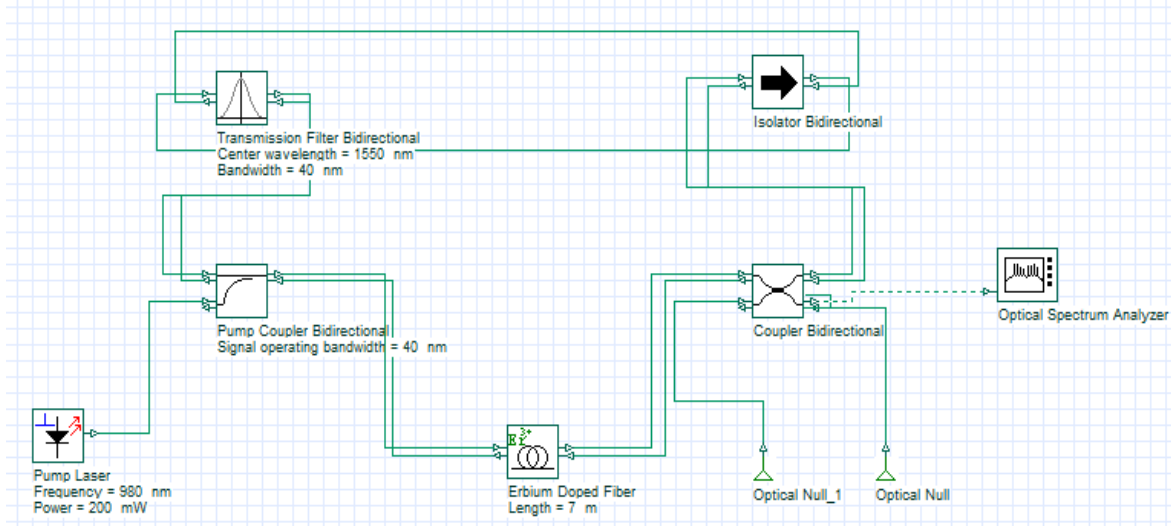
- منحنى الربح بتابعية استطاعة إشارة الضخ عند الطول الموجي 1550 nm من أجل عدة أطوال لوسط الربح باستطاعة إشارة دخل ثابتة $P_s = -14\text{ dBm}$ الموضح في الشكل (12):



الشكل(12): تزداد قيمة الربح بزيادة استطاعة الضخ.

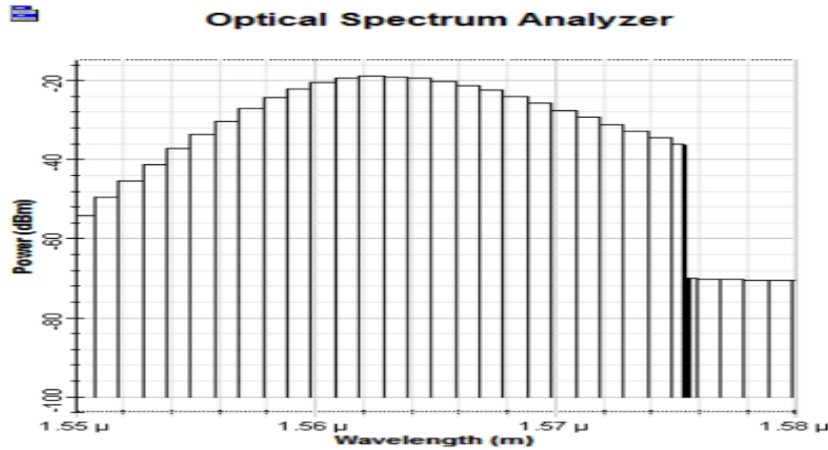
ثانياً: دراسة طيف ASE:

للحصول على منحنى الإصدار التلقائي ASE يجب عدم تطبيق أي إشارة خارجية في الليف البصري (وسط الربح)، بل يجب أن تطبق فقط إشارة المضخة. يوضح الشكل (13) الدارة البصرية المقترحة لاستنتاج ASE وذلك عند وضع وسط الربح في حلقة تضم مرشحاً بصرياً صرفاً عرض نطاقه 50nm (عرض نطاق إصدار الليف المشاب بالإنريوم)، ونحصل بتنفيذ المحاكاة على منحنى ASE المطلوب كما هو موضح في الشكل (14) حيث تم اختيار خاصية رسم المنحنى على شكل درجي لإظهار قيم ASE بوحدة dBm بشكل واضح.



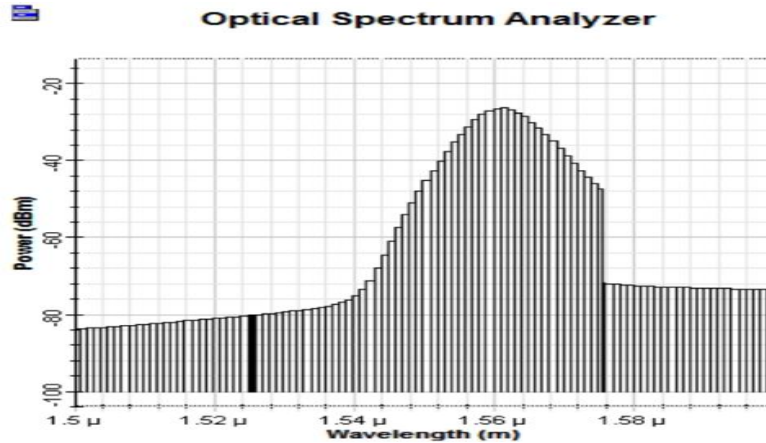
الشكل (13): الدارة البصرية المقترحة لاستنتاج منحنى الإصدار التلقائي المضخم ASE.

ويبين الشكل (14) قيم ASE بمجال طيفي ضيق من أجل استطاعة ضخ $P_p = 50\text{mW}$:



الشكل (14): طيف استطاعة ASE ضيق.

ويبين الشكل (15) قيم ASE بمجال طيفي عريض من أجل استطاعة ضخ $P_p = 50\text{mW}$:



الشكل (15): طيف استطاعة ASE عريض.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

قمنا في هذا البحث باقتراح دارتين بصريتين للتمكن من دراسة وسط ربح ليفي بهدف الحصول على جميع خصائصه والاستفادة من البحث لاحقاً واستثمار النتائج في تصميم ليزر ليفي لتطبيقات WDM.

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

- تمكننا الدارة البصرية المقترحة في الشكل (8) والشكل (13) من إيجاد جميع خصائص وسط الربح الليفي المدروس كما هو مبين في الأشكال (9,10,11,12,13)
- تبلغ قيمة الربح للوسط الليفي المدروس 30 dB ضمن مجال طيفي مهم تبلغ قيمته 30nm .
- تبلغ قيمة التمدد في الربح 1dB ضمن مجال طيفي 30nm .
- مكنتنا الطرق المقترحة في الشكل (9) من إيجاد ASE للوسط المدروس بسهولة.

التوصيات:

- العمل على إعادة الدراسة واستنتاج خصائص وسط الربح الليفي من أجل أوساط ربح ليفية مطعمة بعناصر أرضية نادرة مثل التوليوم والبراسيديوم.
- العمل على تخفيض التمدد في الربح عبر دراسة تقنيات تسطيح الربح.
- تصميم ليزر ليفي - اعتماداً على نتائج البحث - خاص بتطبيقات WDM.

References:

- [1] KLENKE, A; MULLER, M; STARK, H; KIENEL, M; JAUREGUI, C; TUNNERMANN, A; LIMPET, J. *Coherent Beam Combination of Ultrafast Fiber Lasers (Invited Paper)*. IEEE, GERMANY, Vol. 24, N°.5, 2018.
- [2] FU, W; WRIGHT, L; SIDORENKO, P; BACKUS, S; WISE, F. *Several new Directions for Ultrafast Fiber Lasers*. OPTICS EXPRESS, USA, Vol. 26, N°.8, 2018, 9432-9463.
- [3] WEI, C; LUO, H; SHI, H; LYU, Y; ZHANG, H; LIU, Y. *Widely Wavelength Tunable Gain-Switched Er⁺³ Doped ZBLAN Fiber Laser around 2.8 μm*. OPTICS EXPRESS, USA, Vol. 25, N°.8, 2017, 8816-8827.

- [4] BINH, L. *Optical Fiber Communication Systems with Matlab® and Simulink® Models*. 2nd. ed., Taylor & Francis Group, LLC, GERMANY, 2015, 849.
- [5] CONE, R; THIEL, C; SUN, Y; BOTTGER, T; MACFARLANE, R. *Rare-Earth-Doped Materials with Application to Optical Signal Processing, Quantum Information Science, and Medical Imaging Technology*. The University of San Francisco, 2012, doi:10.1117/12.909154.
- [6] ALEKHIA, P; GRACE, K; SUKSHITHA, N; JYOTHIRMAI, L. *Analyzing Gain Spectrum and ASE (Amplified Spontaneous Emission) of EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) by using Matlab*. IJERT INDIA, Vol 7, N°.2, 2018, 279-281.
- [7] ZHU, W; QIAN, L; HELMY, A. *Implementation of three functional devices using Erbium-doped Fibers: An Advanced Photonics Lab*, CANADA, wen.zhu@utoronto.ca.
- [8] PADWAL, S; CHATTOPADHYAY, M. *Modeling of Gain in EDFA and it's Behavior in C and L Band*. IJAEIE, INDIA, Vol 1, N°.3, 2012, 25-29.
- [9] DIGONNET, M. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. 2nd. ed., Marcel Dekker, Inc, USA, 2001, 777.
- [10] DONG, L; SAMSON, B. *Fiber Lasers*. Taylor & Francis Group, LLC, USA, 2017, 311.
- [11] ZYSKIND, J; SRIVASTAVA, A. *Optically Amplified WDM Networks*, Elsevier Inc, USA, 2011, 464.
- [12] DHOKAR, A; DESHMUKH, S. *Design and Performance analysis of Dynamic EDFA*. IOSRJEN, INDIA, Vol 5, N°.7, 2015, 23-33.
- [13] SAKKOUR, A. *Studying of EDFA Performance for Different Concentrations of Erbium Atoms in the Energy Levels*. IJCST INDIA, Vol 7, N°.4, 2019, 111-117.
- [14] GILES, R; Desurvire, E. *Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. IEEE, Vol. 9, N°.2, 1991, 271-283.
- [15] MIKIRTYCHEV, T. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*, Springer International Publishing Switzerland, USA, 2014, 253.
- [16] DESURVIRE, E. *Erbium-Doped Fiber Amplifier: Principles and Applications*, John Wiley & Sons. Inc Lucent Technologies, New Jersey, 2002, 770.
- [17] THYAGARAJAN, K; GHATAK, A. *LASERS: Fundamentals and Applications*. 2nd.ed., Springer Science+Business Media, LLC, 2010, 650.
- [18] BECKER, P. C; OLSSON, N. A; SIMPSON, J. R. *Erbium-Doped Fiber Amplifier: Fundamentals and Technology*, Lucent Technologies, USA, 1999, 460.