



جمهورية العراق  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة بغداد  
كلية التربية للعلوم الصرفة / ابن الهيثم

**دراسة نظرية لقدرة الخرج في ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم**

رسالة مقدمة إلى

مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة / ابن الهيثم / جامعة بغداد  
وهي جزء من متطلبات نيل درجة ماجستير علوم في الفيزياء

قدمتها

**أسيل صالح طه**

(بكالوريوس علوم فيزياء 2006)

بإشراف

م.د. مظهر شهاب أحمد

أ.د. سمير عطا مكي

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَ اللَّهِ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ جَلَّ عِلْمُهُ  
أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سورة البقرة (32)

## شكر وتقدير

أحمد الله عز وجل كما يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه، وأشكره على نعمه التي لا تعد ولا تحصى، وأرفع اليه أسمى آيات الحمد والثناء حتى يرضى، وأسجد حمداً وشكراً أن منّ عليّ بنعمة الصحة والتوفيق الى طريق العلم والمعرفة، والصلاة والسلام على سيدنا محمد نبي هذه الأمة وقدوة الأولين والآخرين وعلى آله وصحبه أجمعين.

وبعد شكر الله عز وجل وحمده، يسعدني أن أتقدم في هذا المقام بجزيل الشكر والعرفان إلى أستاذي ومعلمي ومشرفيّ على الرسالة كل من **الدكتور سمير عطا مكي** و**الدكتور مظهر شهاب أحمد** اللذان تعهدوني برعايتهم وحسن تعاملهم وكرم أخلاقهم وسعة صدرهم بتوجيهاتهم السديدة، فلقد أعطيت الكثير من وقتهم، وبذلا كل ما في وسعهم لتذليل المصاعب وتخطي العقبات التي واجهتني، وقد كان لكل ما قدموه ابلغ الأثر في هذه الدراسة، ومهما قلت وعبرت عما في نفسي من امتنان فلن أوفيهما حقهما من التقدير، جعل الله عملهم هذا في موازين حسناتهم، وجزاهم الله خير الجزاء.

وكذلك أتقدم بالشكر الى رئيس قسم الفيزياء **الدكتور محمد عبد النبي ثجيل** على مساعدته طوال مدة الدراسة والبحث.

ويطيل الوقوف ويحلو في ميدان الشاكرين مسجلة شكري **للدكتور مصطفى كامل جاسم** الذي قدم كل ما استطاع تقديره وضغط على نفسه ليقدم أكثر المستطاع جزاه الله بما قدمت يداه جزيل العطاء.

ويسعدني أن أخص بالشكر **الدكتور حميد مجيد عبد الجبار** لما قدمه من مساعدة وفيض من العلم، فله مني كل التقدير والامتنان.

وكذلك أقدم الشكر والاحترام للتعاون الرائع الذي أبدته **الدكتورة سميرة أحمد إبراهيم**، فلها كل الحب والامتنان.

وكذلك كل الشكر والتقدير **للأستاذ عادل إسماعيل كاظم** لما قدمه لي من مساعدة ومساندة طوال مدة البحث.

وأقدم بالشكر الجزيل **للمست رفاة إسماعيل نوري** لمساعدتها القيمة في مشروع البحث، فلها كل الحب والتقدير.

وأقدم الشكر لأساتذتي الكرام في قسم الفيزياء لما بذلوه من خبرة وعطاء مستمرين زودوني بهما طوال دراستي، فلهم مني كل الحب والامتنان داعية الله ان يمدهم بدوام الصحة والموفقية.

الباحثة

## الإهداء

إلى من كلفه الله بالهبة والوقار، إلى من علمني العطاء بدون انتظار،  
إلى من أحمل اسمه بكل افتخار، أرجو من الله أن يمدّ في عمرك لترى  
ثماراً قد حان قطفها بعد طول انتظار، وستبقى كلماتك نجوما أهتدي  
بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد

والدي الحبيب

إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني  
إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي، إلى أغلى  
الأحبة

والدتي الحبيبة

إلى من به أكبر، وعليه أتعتمد، إلى شمعة مقدّة تثير ظلمة حياتي، إلى  
من بوجوده أكتسب قوة ومحبة لا حدود لها

زوجي العزيز (علي)

إلى توأم روحي ورفيقة دربي، إلى من رافقتني منذ أن حملنا حقايب  
صغيرة، ومعك سرت الدرب خطوة بخطوة، وما تزال ترافقني حتى  
الآن

أختي (وسن)

إلى الأخ تين اللتين لم تلدهما أمي، إلى من تحلّتا بالإخاء وتميزتا  
بالعطاء

صديقتي العزيزات (زينب وإيناس)

إلى كل من يقع نظره على هذا الجهد المتواضع قارئاً أو طالب علم  
أهديكم ثمرة هذا العمل المتواضع عسى أن يجعله الله علماً نافعاً  
وعملاً مقبولاً.

## توصية المشرفين

نقر ان اعداد هذه الرسالة الموسومة بـ (دراسة نظرية لقدرة الخرج في ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم) التي قدمتها الطالبة أسيل صالح طه قد جرى تحت بإشرافنا في كلية التربية للعلوم الصرفة/ ابن الهيثم /جامعة بغداد ، وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير علوم في الفيزياء.

التوقيع: -	التوقيع: -
التاريخ: - / / 2015	التاريخ: - / / 2015
اسم المشرف: د. مظهر شهاب أحمد	اسم المشرف: - د. سمير عطا مكي
المرتبة العلمية: - مدرس	المرتبة العلمية: - أستاذ

## توصية رئيس قسم الفيزياء

إشارة الى التوصيات المتوافرة، أشرح هذه الرسالة الى لجنة المناقشة لدراستها وبيان الرأي فيها.

التوقيع: -  
التاريخ: - / / 2015  
الاسم: - د. محمد عبد النبي ثجيل  
المرتبة العلمية: -أستاذ مساعد

## إقرار المقوم اللغوي

أشهد أنني راجعت رسالة الطالبة (أسيل صالح طه) الموسومة بـ (دراسة نظرية لقدرة الخرج في ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم) من الناحية اللغوية، وصحت ما ورد فيها من أغلط لغوية وتعبيرية، وهي -الآن- مؤهلة للمناقشة قدر تعلق الأمر بسلامة الأسلوب وصحة التعبير.

التوقيع: -

الاسم: - د. خالد عبود حمودي

الدرجة العلمية: - مدرس

التاريخ: -

## إقرار لجنة المناقشة

نشهد نحن أعضاء لجنة المناقشة اننا اطلعنا على الرسالة الموسومة بـ (دراسة نظرية لقدرة الخرج في ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم) التي قدمتها (أسيل صالح طه) وقد ناقشنا الطالبة في محتوياتها وفي ما له علاقة بها، ونرى أنها جديرة بالقبول لنيل درجة ماجستير في علوم الفيزياء.

### رئيس اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. حسين علي جواد

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: جامعة بغداد/معهد الليزر للدراسات العليا

التاريخ: / / 2015

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. هادي جبار مجيب

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: - جامعة بغداد /

كلية التربية للعلوم الصرفة-أبن الهيثم

التاريخ: / / 2015

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. محمد عبد الرضا حسين

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: الجامعة التكنولوجية /

كلية الهندسة الليزر

التاريخ: / / 2015

### عضو اللجنة المشرف

التوقيع:

الاسم: د. مظهر شهاب أحمد

المرتبة العلمية: مدرس

العنوان: جامعة بغداد/ كلية التربية

### عضو اللجنة المشرف

التوقيع:

الاسم: د. سمير عطا مكي

المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: جامعة بغداد / كلية التربية

للعلوم الصرفة –أبن الهيثم  
التاريخ: / / 2015

للعلوم الصرفة –أبن الهيثم  
التاريخ: / / 2015

صدقت من قبل مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة – ابن الهيثم / جامعة بغداد  
التوقيع :  
الاسم : د. خالد فهد علي  
المرتبة العلمية : أستاذ مساعد  
التاريخ : / / 2015



## الخلاصة

انطوت الدراسة الحالية على المعالجة النظرية لأشتقاق معادلة قدرة الخرج الليزري باستعمال معادلات المعدل لنظام ليزري مستمر الموجة والذي يعمل وفقاً لخطة الضخ شبه الثلاثي لمستويات الضخ والانبعاث، حيث يصل فيه الضخ مباشرةً الى مستوى الليزر العلوي ويكون أمتصاص الحالة المثارة (ESA) مهملًا.

تم تطبيق هذه المعادلة على ليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذات الانبعاث الليزري ( $2.32 \times 10^{-6} \text{m}$ ) والذي يضخ بطول موجة ( $0.790 \times 10^{-6} \text{m}$ ) كمثال انمذجي لليزرات الليف البصري التي تعمل وفقاً لخطة الضخ هذه بأستخدام برنامج (MATLAB, 8.1) لمحاكاة تأثير المعاملات التي تتضمنها معادلة قدرة الخرج الليزري الخاصة بهذا النوع من الليزر.

بينت نتائج هذه المحاكاة، ان قدرة الخرج الليزري تزداد بزيادة تركيز الثوليوم في لب الليف البصري وأنها تثبت عند قيمة محددة ( $3 \times 10^{26} \text{ion/m}^3$ )، كما انها تزداد بزيادة قدرة الضخ ( $P_p(0) = 350 \text{W}$ )، وبزيادة انعكاسية مرآة الخرج الليزري ( $R_2 = 0.85$ )، كذلك فان قيمتها تكون اعلى في حالة استخدام ليف بصري أحادي النمط ( $r = 1.5 \times 10^{-6} \text{m}$ )، في حين وجدنا ان قدرة الخرج الليزري تقل بزيادة كل من نصف قطر وطول الليف البصري بافتراض أن تكون جميع المعاملات الأخرى ثابتة.

## المحتويات

الصفحة	الموضوع	التسلسل
22-1	الفصل الأول: الألياف البصرية	
1	مقدمة	1-1
2	الليف البصري	1-2
2	اللب	1-2-1
3	العاكس	1-2-2
3	الغطاء الواقي	1-2-3
6	أنواع الألياف البصرية	1-3
6	الألياف متعددة النمط وبمعامل أنكسار عتبي	1-3-1
6	الألياف متعددة النمط وبمعامل أنكسار متدرج	1-3-2
7	الألياف أحادية النمط وبمعامل أنكسار عتبي	1-3-3
8	التوهين في الليف البصري	1-4
8	الامتصاص	1-4-1
8	الاستطارة	1-4-2
9	التشتت	1-4-3
9	الانحناءات	1-4-4
9	الربط	1-4-5
10	عناصر الأتربة النادرة	1-5
11	المضيفات	1-6
13	ليزرات الليف البصري المطعم بعناصر الأتربة النادرة.	1-7
14	ليزر الليف البصري المطعم بالتوليوم	1-8
16	الدراسات السابقة	1-9
21	الهدف من هذا العمل	1-10
22	تنظيم الرسالة	1-11
33-23	الفصل الثاني: الأنموذج النظري	
23	مقدمة	2-1
23	معادلات المعدل	2-2
28	شدة الضخ	2-3
29	شدة الليزر	2-4

30	الكسب	2-5
61-34	الفصل الثالث: النتائج والمناقشة	
34	مقدمة	3-1
36	حساب ( $P_{th}$ )	3-2
36	تغير كل من ( $P_{th}$ ) ( $\alpha_p$ ) نتيجة لتغير ( $N$ )	3-2-a
37	تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير ( $A_{eff}$ )	3-2-b
38	تغير كل من ( $P_{th}$ ) و ( $G_{th}$ ) نتيجة لتغير ( $L$ )	3-2-c
39	تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير ( $R_2$ )	3-2-d
40	حساب ( $\eta_s$ )	3-3
40	تغير ( $\eta_s$ ) نتيجة لتغير ( $L$ )	3-3-a
41	تغير ( $\eta_s$ ) نتيجة لتغير ( $R_2$ )	3-3-b
42	حساب ( $P_{abs}$ )	3-4
42	تغير كل من ( $P_{abs}$ ) و ( $\alpha_p$ ) نتيجة لتغير ( $N$ )	3-4-a
43	تغير ( $P_{abs}$ ) نتيجة لتغير ( $L$ )	3-4-b
43	حساب ( $P_{out}$ )	3-5
44	تأثير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري ( $N$ )	3-5-a
46	تأثير المساحة الفعالة لللب الليف البصري ( $A_{eff}$ )	3-5-b
48	تأثير طول الليف البصري ( $L$ )	3-5-c
50	تأثير انعكاسية مرآة الخرج الليزري ( $R_2$ )	3-5-d
52	تأثير قدرة الضخ $P_p(0)$	3-5-e
54	تأثير نوع الليف البصري	3-5-f
57-56	الحالة الأولى	3-6
59-58	الحالة الثانية	3-7
61-60	الحالة الثالثة	3-8
63-62	الفصل الرابع: الاستنتاجات والمشاريع المستقبلية المقترحة	
62	الاستنتاجات	4-1
63	المشاريع المستقبلية المقترحة	4-2
64	المصادر	
	الملحق (1,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)	

## List of symbols

## قائمة الرموز

الرمز	المعنى
$n_1$	معامل انكسار لب الليف البصري
$n_2$	معامل انكسار العاكس في الليف البصري
$\theta_c$	الزاوية الحرجة
$N_A$	فتحة النفوذ العددية
$v$	التردد المعياري
$r$	نصف قطر لب الليف البصري
$w_0$	قطر المجال للنمط
$A_{eff}$	المساحة الفعالة لمقطع لب الليف البصري
$\alpha$	معامل التوهين في الليف البصري
$L$	طول الليف البصري
$N_i$	عدد الأيونات لوحدة الحجم في المستوى (i)
$t$	الزمن
$W_{ij}$	الاحتمالية لوحدة الزمن لانحلال الأيون تلقائياً من المستوى (i) الى المستوى (j)
$W_i$	معدل الانحلال التلقائي الكلي للمستوى (i)
$W_{ij}^i$	معدل الانتقال المحفز بواسطة الانبعاث او الامتصاص من المستوى (i) الى المستوى (j)
$N$	العدد الكلي للأيونات لوحدة الحجم
$N_{ex}$	العدد الكلي للأيونات لوحدة الحجم في الحالة المثارة
$W_p$	معدل الضخ
$\lambda_p$	طول موجة الضخ
$\sigma_p$	المقطع العرضي عند طول موجة الضخ
$v_p$	تردد موجة الضخ
$h\nu_p$	طاقة فوتون موجة الضخ
$\alpha_p$	معامل التوهين عند طول موجة الضخ
$\lambda_L$	طول موجة الليزر
$\sigma_L$	المقطع العرضي عند طول موجة الليزر
$\nu_L$	تردد موجة الليزر
$h\nu_L$	طاقة فوتون الليزر

$I_p$	شدة الضخ
$I$	شدة الليزر
$I_{sat}$	شدة الاشباع الليزرية
$I^+$	شدة الليزر باتجاه (+Z)
$I^-$	شدة الليزر باتجاه (-Z)
$J_i$	العدد الكمي للزخم الزاوي الكلي
$g_i$	تعددية المستوي (i)
$X_p$	النسبة بين معدل الانبعاث والامتصاص المحفزين بفعل طول موجة الضخ
$X_L$	النسبة بين معدل الانبعاث والامتصاص المحفزين بفعل طول موجة الليزر
$\beta_{ij}$	احتمالية استرخاء الأيون المثار بخطوة واحدة من المستوى (i) الى المستوى (j)
$b_{ij}$	احتمالية استرخاء الأيون المثار بمجموعة خطوات من المستوى (i) الى المستوى (j)
$R_p$	نسبة تغير معدل الضخ
$L$	طول تجويف فابري-بيروت
$T_i$	زمن بقاء الأيون في المستوى (i)
$g$	معامل الكسب
$G_{th}$	معامل الكسب عند العتبة
$R_1$	انعكاسية مرآة تجويف فابري - بيروت التي تكون (100%)
$R_2$	انعكاسية مرآة الخرج الليزري في تجويف فابري -بيروت
$P_{in}$	قدرة الضخ داخل تجويف فابري - بيروت المادي على الوسط الفعال
$P_{th}$	قدرة عتبة الضخ
$T$	نفاذية مرآة الخرج الليزري في تجويف فابري - بيروت
$\eta_s$	كفاءة جهاز الليزر
$P_{abs}$	قدرة الضخ الممتصة فعلاً من الوسط الفعال
$P_{out}$	قدرة الخرج الليزري

## List of Abbreviations

## قائمة الاختصارات

Term	Meaning
REE's	Rare Earth Elements
TDFA	Thulium – Doped Fiber Amplifier
TDFL	Thulium – Doped Fiber Laser
MFD	Mode – Field Diameter
MMF's	Multi – Mode Fibers
SMF's	Single – Mode Fibers
GSA	Ground State Absorption
ESA	Excited State Absorption
ZBLAN	ZrF <sub>4</sub> – BaF <sub>2</sub> – LaF <sub>2</sub> – AlF <sub>3</sub> – NaF
C.W	Continuous Wave
NLSE	Nonlinear Schrödinger Equation

## List of figures

## قائمة الأشكال

رقم الشكل	الاسم	الصفحة
1-1	تركيب الليف البصري	3
1-2	الانعكاس الكلي داخل الليف البصري	4
1-3	الفرق بين الليف البصري أحادي النمط ومتعدد النمط	7
1-4	الانتقالات لأيون الثوليوم في مضيف زجاج (ZBLAN)	15
2-1	منظومة ليزر ذات ثلاثة مستويات طاقة	23
2-2	الشدة الليزرية داخل التجويف الرنيني	29
2-3	المكونات الأساسية للجهاز الليزري	31
3-1	المستويات الطاقية لليزر زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذي الانبعاث الليزري ( $2.32\mu\text{m}$ )	34
3-2	تغيير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري	45
3-3	تغيير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير نصف قطر لب الليف البصري	47
3-4	تغيير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير طول الليف البصري	49
3-5	تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري.	51
3-6	تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير قدرة الضخ.	53
3-7	تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير نوع الليف البصري.	55
3-8	تغير قدرة الخرج الليزرية نتيجة لتغير قدرة الضخ عندما ( $r=7.8\mu\text{m}$ )، ( $L=50\text{cm}$ )	57
3-9	تغير قدرة الخرج الليزرية نتيجة لتغير قدرة الضخ عندما ( $r=5\mu\text{m}$ )، ( $L=7\text{cm}$ )	59
3-10	تغير قدرة الخرج الليزرية نتيجة لتغير قدرة الضخ عندما ( $r=35\mu\text{m}$ )، ( $L=150\text{cm}$ )	61

## قائمة الجداول

رقم الجدول	الاسم	الصفحة
1-1	الأطوال الموجية الليزرية لبعض عناصر الأتربة النادرة	14
3-1	المعاملات الأساسية لمعادلة قدرة الخرج الليزري الخاصة بليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم	35
3-2	المعاملات الخاصة التي اعتمدت في حساب كل من قدرة عتبة الضخ والكفاءة والقدرة الممتصة فعلاً	36
3-3	تغير قدرة عتبة الضخ بتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري	37
3-4	تغير قدرة عتبة الضخ بتغير نصف قطر لب الليف البصري	38
3-5	تغير كل من قدرة عتبة الضخ والكسب عند العتبة بتغير طول الليف البصري	39
3-6	تغير كل من قدرة عتبة الضخ والكسب عند العتبة بتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري	40
3-7	تغير الكفاءة بتغير طول الليف البصري	41
3-8	تغير الكفاءة بتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري	41
3-9	تغير القدرة الممتصة فعلاً بتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري	42
3-10	تغير القدرة الممتصة فعلاً بتغير طول الليف البصري	43
3-11	تغير التردد المعياري بتغير نصف قطر لب الليف البصري	54
3-12	المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الأولى	56
3-13	المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الثانية	58
3-14	المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الثالثة	60



## Introduction

## (1-1) مقدمة

ظهر على مر السنين العديد من أشكال أنظمة الاتصال، وكان الدافع وراء كل شكل جديد اما تحسين دقة الإرسال، وإما زيادة كمية المعلومات التي يمكن إرسالها، وإما زيادة مسافة الإرسال، وكان اكتشاف الألياف البصرية (Optical fibers) ثورة في عالم الاتصالات [1].

مرت هذه التقنية بمراحل عديدة يمكن تقسيمها على خمسة أجيال، إذ استعمل في الجيل الأول مصدر بصري مصنع من زرنيخ الجاليوم (Ga As)، وكواشف سليكونية تعمل بأطوال موجية (810nm – 900nm)، وفي الجيل الثاني تم تطوير كل من المصادر البصرية والكواشف كي تعمل عند الطول الموجي (1300nm) إذ انخفض مقدار التوهين في الليف البصري الى (1dB/Km) [2].

وأدى استعمال الألياف البصرية أحادية النمط في الجيل الثالث الى تقليل التشتت في الألياف البصرية متعددة الأنماط مما أدى الى الحصول على سعة نطاق عالية، وقد تم في هذا الجيل تشغيل وصلات بصرية ت ستعمل الألياف البصرية أحادية النمط عند الطول الموجي (1300nm) للحصول على توهين يقل عن (1dB/m) [3].

وتم في الجيل الرابع تشغيل أنظمة الاتصال عبر الألياف البصرية عند الطول الموجي (1550nm) بتوهين أقل مما هو عند الطول الموجي (1300nm)، كما تم تطوير كل من المصادر البصرية والكواشف من أجل بناء منظومة اتصال تعمل بمعدل نقل معلومات عالٍ جداً [4].

استمرت الأبحاث في تطوير عناصر نظم الاتصالات عبر الألياف البصرية للحصول على الظروف التشغيلية المناسبة مما مهد الى بروز الجيل الخامس الذي توافرت له عناصر عدة، فكانت البداية في تحسين حساسية أجهزة الاستقبال، وكذلك تمكن الباحثون من تطعيم الألياف الزجاجية ببعض عناصر الأتربة النادرة مثل ( $Er^{+3}$ ،  $Nd^{+3}$ ،  $Yb^{+3}$ ،  $Tm^{+3}$  ....) مما اعطى تطوراً سريعاً وواسعاً لاستعمال أنظمة الاتصال عبر الألياف البصرية عند الطول الموجي (1550nm) إذ أدى ذلك إلى الحصول على مضخمات ذات كسب مرتفع وجدت استعمالاً واسعاً في خطوط النقل،

ولم يقتصر استعمال الألياف المطعمة على المضخات ، فحسب بل تمكن الباحثون من استعمالها كوسط فعال لإنتاج ليزرات الليف البصري ( Optical fiber lasers) [6,5]، ومن هذه الليزرات ليزر الليف البصري المطعم بالتوليم (TDFL) (Tm<sup>3+</sup>-doped fiber laser) والذي يمثل موضوع البحث في هذه الدراسة.

## Optical fiber

### (1-2) الليف البصري

هو عبارة عن أسلاك زجاجية طويلة ورفيعة جداً قطرها تقريباً (1µm)، ويجمع العديد من هذه الأسلاك في حزم داخل الكابلات الضوئية لغرض نقل الإشارات الضوئية لمسافات بعيدة جداً [2].

تتطلب عملية تصنيع الليف البصري المرور بعدة مراحل ، في البداية يتم عمل أسطوانة زجاجية بواسطة عملية الترسيب البخاري الكيماوي المعدل ، وهي عملية معقدة جداً تتم تحت درجة حرارة عالية وظروف كيميائية خاصة ، ويتم فيها تفاعل كلوريد السليكون (SiCl<sub>4</sub>) وكلوريد الجرمانيوم (GeCl<sub>4</sub>) مع الأوكسجين لإنتاج ثاني أوكسيد السليكون (SiO<sub>2</sub>) وثاني أوكسيد الجرمانيوم (GeO<sub>2</sub>) اللذين يجمعان معاً ويذابان داخل الأنابيب لتشكيل مادة الليف البصري، إذ يمكن التحكم بكل من درجة نقاء وصفات الزجاج عن طريق التحكم بهذا الخليط ، ومن ثم يتم سحبها بصورة أسلاك رفيعة وطويلة بواسطة أبراج سحب الألياف ، وتعالج بتغليف متتابع في أثناء سحبها مع قياسي مستمر لنصف قطر السلك باستعمال مايكرومتر ليزري [7].

بعد ذلك يتم فحص الليف البصري من ناحية: قوة الشد، انتظام قطر اللب، وأبعاد أغلفة الحماية، ومعامل الانكسار لللب والعاكس، ومدى ضعف الإشارة بزيادة طول الليف، وعرض الحزمة، ودرجة حرارة التشغيل، ومدى الرطوبة وارتباطها بضعف الإشارة، وقابلية التوصيل تحت الماء. [7]

ويتألف الليف البصري من ثلاثة أجزاء رئيسة هي كالآتي [1]: -

#### (1-2-1) اللب (Core): -

وهو عبارة عن زجاج رفيع جداً ذي معامل انكسار ( $n_1$ )، ويعد اللب أهم مناطق الليف البصري، لأن الموجة الكهرومغناطيسية تنتقل فيه [1].

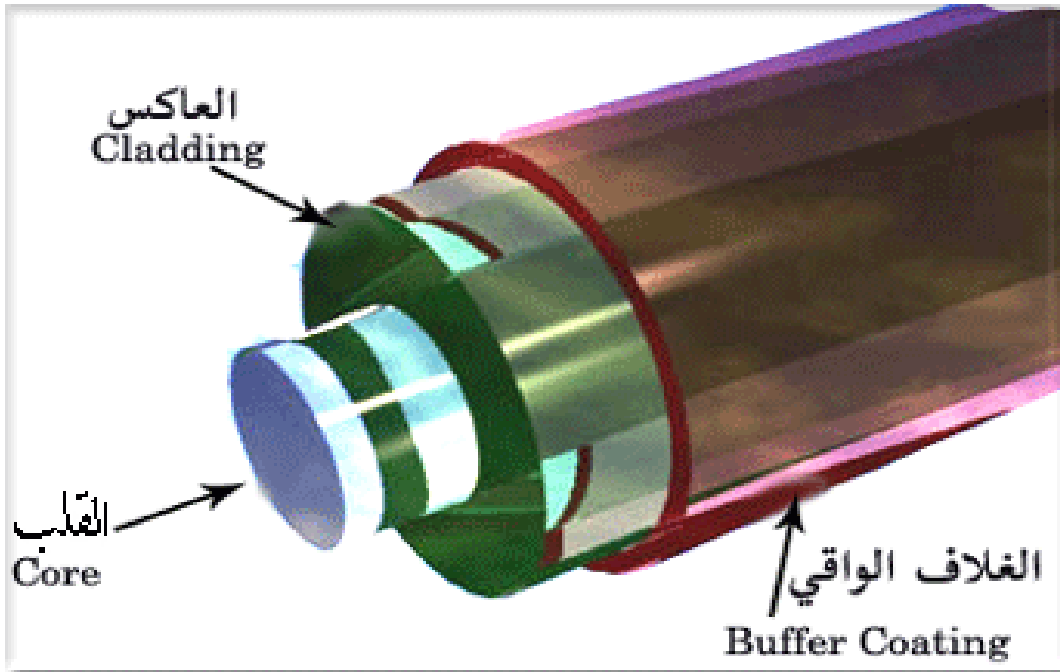
### (1-2-2) العاكس (Cladding) :-

وهو مادة تحيط باللب وتعمل على عكس الموجة الكهرومغناطيسية إلى لب الليف البصري، وتصنع من مادة شفافة بصرياً ذات معامل انكسار ( $n_2$ )، إذ إن الاختلاف في قيم معامل الانكسار ما بين الـ لب والعاكس يكون لضمان انتشار الموجة الكهرومغناطيسية في لب الليف البصري فحسب [1].

### (1-2-3) الغلاف الواقي (Buffer coating) :-

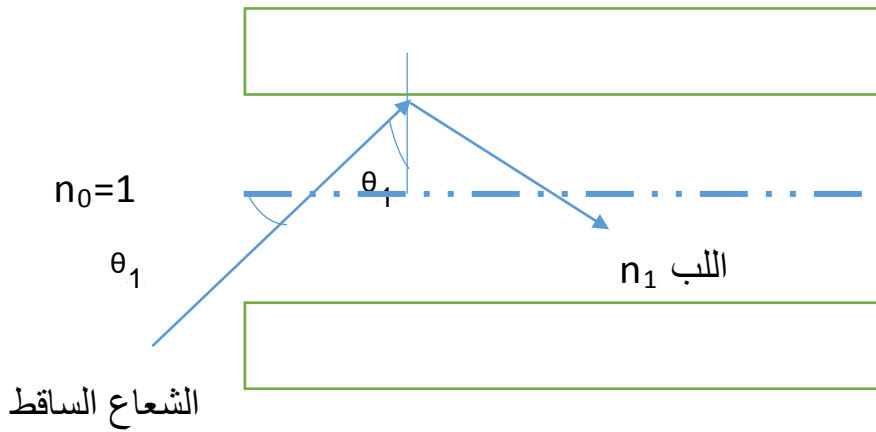
وهو غلاف بلاستيكي يحيط بالعاكس، ويصنع عادة من مادة مطاطية غير شفافة من أجل حماية الليف البصري من الرطوبة، والضرر، والكسر [1].

ويوضح الشكل (1-1) تركيب الليف البصري



الشكل رقم (1-1) تركيب الليف البصري [1]

إن كل وسط مادي يعوق انتشار الموجة الكهرومغناطيسية بنسب متفاوتة، مما يعني أن سرعة انتشار هذه الموجة عبر أي وسط أقل منها في الفراغ، ويعتمد انتشار الموجة الكهرومغناطيسية عبر الليف البصري على مبدأ الانعكاس الداخلي الكلي (Total internal reflection)، ويوضح الشكل (1-2) ظاهرة الانعكاس الكلي في الليف البصري [2].



الشكل رقم (1-2) الانعكاس الكلي داخل الليف البصري [2,3]

ويعبر عن الزاوية الحرجة (Critical angle) بالعلاقة الآتية [2]: -

$$\theta_c = \sin^{-1}\left[\frac{n_2}{n_1}\right] \dots\dots\dots (1-1)$$

فإذا كانت زاوية سقوط الموجة الكهرومغناطيسية أكبر من الزاوية الحرجة ( $\theta_1 > \theta_c$ ) وكان ( $n_1 > n_2$ ) فإن الانعكاس الكلي الداخلي لهذه الموجة سوف يحدث في لب الليف البصري [2].

أما فتحة النفوذ العددية (Numerical Aperture) فيعبر عنها بالعلاقة [2,3]: -

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots\dots\dots (1-2)$$

وعادة ما تستعمل عملياً عدسات بين المصدر الضوئي ومقدمة الليف البصري وبين نهاية الليف البصري والكاشف الضوئي من أجل تجميع وتركيز الحزمة الضوئية [2].

## الألياف البصرية

## الفصل الأول

إن انتشار الموجة الكهرومغناطيسية عبر الليف البصري يكون بنحوٍ محدود من الحزم الضوئية، وبزوايا معينة ذات قيم محددة، وتسمى هذه الحزم الضوئية بأنماط الانتشار (Propagation modes) [2].

وعند الحديث عن أنماط الانتشار يجب التعرف على قيمة عددية مجردة من الوحدات تعرف بالتردد المعياري (Normalized frequency)، ويرمز لها بالرمز (V)، إذ يعبر عنها بالعلاقة الآتية [2,3]: -

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_p} r N_A \dots\dots\dots (1-3)$$

( $\lambda_p$ ) طول الموجة الداخلة للليف البصري، (r) نصف قطر لب الليف البصري، وللحصول على ليف بصري أحادي النمط لا بد من أن يتحقق الشرط [5]:

$$(0 \leq V \leq 2.405)$$

ونظراً لصغر قطر لب الليف البصري؛ لا يمكن للموجة الكهرومغناطيسية أن تنتشر كلياً ضمن منطقة لب الليف البصري، إذ إن جزءاً منها سوف ينتشر في منطقة محيط الليف، لذلك يعبر عن قطر المجال للنمط (Mode Field Diameter) (MFD)، ويرمز لها بالرمز ( $w_0$ )، ويسمى أحياناً بمقاس البقعة الضوئية (Spot size) [7].

وفي المواصفات العملية للليف البصري عادة ما يعطى قطر لب الليف البصري متعدد النمط في حين يعطى قطر مجال النمط للليف البصري أحادي النمط [7,8].

وللتوزيع الكاوسي (Gaussian distribution) يعبر عن قطر مجال النمط بالعلاقة الآتية [8]: -

$$W_0 = r \left[ 0.761 + \frac{1.237}{V^{1.5}} + \frac{1.429}{V^6} \right] \dots\dots\dots (1-4)$$

## (Types of optical fibers)

## (1-3) أنواع الألياف البصرية

تصنف الألياف البصرية تبعاً لمعامل انكسارها وعدد الأنماط فيها إلى ثلاثة أنواع، وهي كالآتي [3,4]: -

### (1-3-1) الألياف متعددة النمط بمعامل انكسار عتبي (Multimode step ) (MMF's) (Index fibers)

يكون معامل الانكسار في هذا النوع ثابتاً إذ يكون لب الليف البصري ذا قيمة ثابتة ( $n_1$ )، ومعامل انكسار العاكس ذا قيمة ثابتة ( $n_2$ )، لذلك تنتشر الحزم الضوئية في قلب الليف البصري بخطوط مستقيمة ، لان الوسط متجانس ، وأن هذه الحزم تسلك مسارات مختلفة في الطول، و بالوغم انها تسير بسرعة ثابتة فان وصولها سوف يكون بأزمان مختلفة، وهذا التأخر الزمني يتسبب في حصول مشكلة التشتت الداخلي للحزمة الضوئية مما يج عل هذا النوع من الليف البصري ذا عرض نطاق محدوداً ونقل المعلومات فيه يكون لمسافة قصيرة بالرغم من أن كلفة تصنيعها قليلة، وانتشار الحزمة الضوئية في لب الليف البصري يكون بأكثر من نمط انتشار [3,4].

### (1-3-2) الألياف متعددة النمط بمعامل انكسار متدرج (Multimode graded ) (index fibers)

إن ما يميز هذه الألياف البصرية هو ان معامل انكسار لب الليف البصري يتغير تدريجياً بدءاً من المركز إذ يكون ذا قيمة ( $n_1$ ) ولغاية الحد الفاصل بين اللب والعاكس إذ يكون ذا قيمة ( $n_2$ ) [3,4].

في حين يكون معامل انكسار العاكس ثابت القيمة ( $n_2$ ). لذلك تنتشر الحزمة الضوئية بخطوط منحنية وليست مستقيمة مما يؤدي الى وجود أكثر من نمط انتشار في هذا النوع من الليف البصري، ومع ذلك يُعدّ هذا النوع أفضل من النوع الأول

لأنه ذا عرض نطاق عريض ونقل المعلومات فيه يكون لمسافات طويلة، بالرغم أن كلفة تصنيعه تكون عالية [3,4].

وفي كلا النوعين لليف متعدد النمط تكون مساحة مقطع ع لب الليف البصري الفعالة هي كالآتي [7]: -

الألياف البصرية

الفصل الأول

$$A_{\text{eff}} = \pi r^2 \dots\dots\dots (1-5)$$

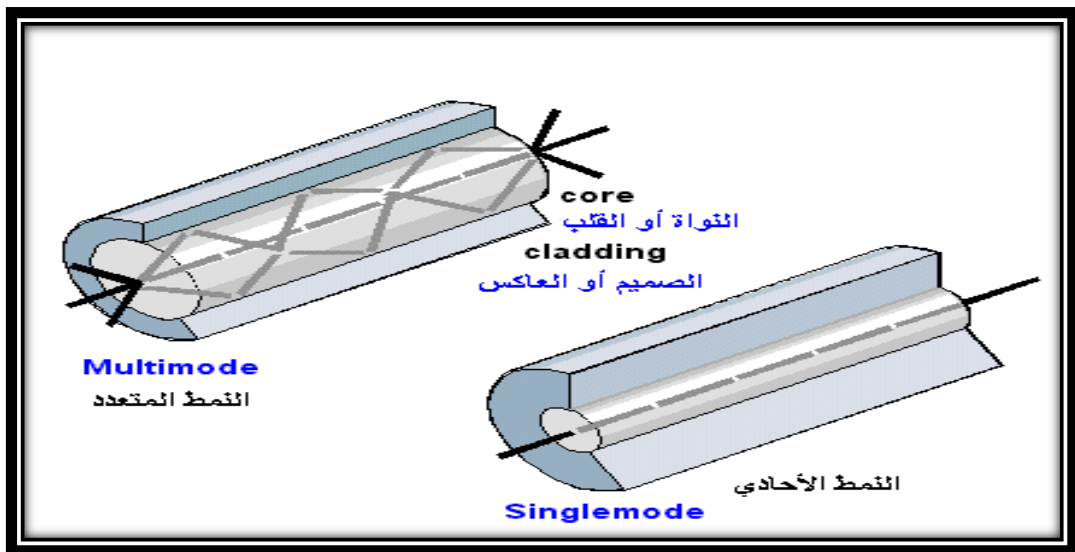
### (1-3-3) الألياف أحادية النمط بمعامل انكسار عتبي ( Single mode step ) (SMF's) (index fiber)

في هذا النوع يكون لب الليف البصري ذا معامل انكسار ثابت  $(n_1)$ ، والعاكس ذا معامل انكسار ثابت  $(n_2)$ ، وتمتاز بأن هناك نمط آ واحداً لانتشار الحزمة الضوئية داخل لب الليف البصري الذي يكون ذا قطر صغير جداً. لذلك فإنه يكون ذا عرض نطاق كبير جداً ، ويستعمل لنقل المعلومات الى مسافات طويلة بالرغم أن كلفة تصنيعه أعلى من النوعين الأول والثاني [4,9].

ونظراً لوجود نمط واحد فقط في هذا النوع من الألياف فإنه يمتاز بكون التشننت الداخلي قليلاً جداً [4,9].

في هذا النوع تكون مساحة مقطع لب الليف البصري الفعالة هي كالآتي [7]: -

$$A_{\text{eff}} = \pi w_0^2 \dots\dots\dots (1-6)$$



## الشكل رقم (1-3) الفرق بين الليف البصري أحادي النمط ومتعدد النمط [7]

### Attenuation in optical fiber

### (1-4) التوهين في الليف البصري

يعد التوهين من اهم العوامل التي تحد من فائدة الليف البصري في نقل الإشارة البصرية وأيضاً المسافة القصوى للإرسال، ويعرف بأنه مقدار الخسارة في القدرة للموجة الكهرومغناطيسية المنتقلة في الليف البصري ، ويقاس التوهين بوحدة (dB/Km) ويعرف بالعلاقة الآتية [5] :-

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_i}{P_0} \dots\dots\dots (1-7)$$

إذ ان (P<sub>i</sub>) القدرة الداخلة، (P<sub>0</sub>) القدرة الخارجة، (L) طول الليف البصري مقدراً بوحدة (Km) [5].

يحدث التوهين في الليف البصري نتيجة للعوامل الآتية [5] :-

### (1-4-1) الامتصاص (Absorption)

يُعدّ الامتصاص السبب الرئيس للخسارة في الليف البصري، ويعرف بأنه الخسارة الناتجة عن تبديد جزء من القدرة الداخلة للليف البصري بصورة حرارة فيه [5,10].

ويحصل الامتصاص بسبب ثلاث اليات مختلفة هي :-

أ - الامتصاص الحاصل بسبب عيوب ذرية في تركيب زجاج الليف البصري [5].

ب - الامتصاص الداخلي الذي هو صفة طبيعية في زجاج الليف البصري [5].  
ج - الامتصاص الخارجي الذي سببه احتواء مادة الليف البصري على شوائب من العناصر الانتقالية [5].

### (1-4-2) الاستطارة (Scattering)

هناك نوعين من الاستطارة تحدث في الليف البصري :-



## أ) الاستطارة الخطية (Linear Scattering)

وهي آلية نقل خطي لبعض أو كل القدرة الداخلة من نمط انتشار معين إلى نمط آخر، ويسفر عن هذه الآلية توهين للقدرة الداخلة نظراً لأن قسماً من هذه الأنماط التي تنقل إليها القدرة هي أنماط مسربة للطاقة، لأنها لا تواصل انتشارها خلال قلب الليف البصري بسبب فقدانها الطاقة بهيئة إشعاع. ومن أنواع الاستطارة الخطية، استطارة رايلي واستطارة مي [10].

الألياف البصرية

الفصل الأول

## ب) الاستطارة غير الخطية (Nonlinear Scattering)

في هذا النوع من الاستطارة يحدث تغير في تردد أو طاقة الموجة الكهرومغناطيسية نتيجة لاستطارة الفوتون إلى فوتون ذا طاقة أقل، إذ يظهر الفرق في الطاقة إما بهيئة فونون بصري (Optical phonon) في حالة استطارة رامان المحفزة، وإما بهيئة فونون صوتي (Acoustic phonon) في حالة استطارة برليون المحفزة، وتأثير هاتين الاستطارتين يكون ملحوظاً فقط عادة في الألياف البصرية الطويلة أحادية النمط وعندما تكون القدرة الداخلة عالية [10].

## (1-4-3) التشتت (Dispersion)

يعرف التشتت بأنه التعريض الذي تتعرض له الموجة الكهرومغناطيسية داخل الليف البصري، وهذا التعريض يسبب تشوه الإرسال عبر الليف البصري، وقد يكون سبب التشتت أن المصدر الضوئي ذا عرض طيفي محدد (لا يبعث الموجة الكهرومغناطيسية بتردد واحد)، وهذا ما يعرف بالتشتت اللوني، أو قد يكون سببه التغير اللاخطي لمعامل انكسار مادة قلب الليف البصري مع تغير طول الموجة الكهرومغناطيسية فيه، وهو ما يعرف بالتشتت المادي [2].

## (1-4-4) الانحناءات (Bends)

تعاني الموجة الكهرومغناطيسية من توهين عند الانحناءات أو الانعطافات التي تحدث في الليف البصري، ويعتمد مقدار التوهين هذا على نصف قطر الانحناء (R)، فعندما يكون (R~r) تعرف هذه الانحناءات بالمايكروية في حين إذا كان (R>>r) فإنها تعرف بالجاهرية التي يكون التوهين أكبر [10].

## (1-4-5) الربط (Splicing)

تتعرض الموجة الكهرومغناطيسية الى التوهين في مناطق الربط بين ليفين، وذلك عندما يكون ليف الإرسال ذا قطر أكبر من قطر ليف الاستقبال، إذ يزداد مقدار التوهين بزيادة هذا الفرق [10].

Rare earth elements

(1-5) عناصر الأتربة النادرة (REE's)

أن الصف الأعلى من صفي العناصر أسفل الجدول الدوري يمثل مجموعة عناصر الأتربة النادرة، وكان العالم (Johann Gadolin) قد اقترح تسمية هذه المجموعة من العناصر بالأتربة النادرة (Rare Earth)؛ لأن الاعتقاد السائد كان أن هذه العناصر موجودة فقط في القشرة الأرضية، وكذلك أكاسيدها تشبه لون التربة، ومما يميز هذه العناصر ان عملية الفصل الكيميائي لها صعوبة نظراً للتشابه في الخواص الكيميائية لها [11].

إن الاستعمال الفعلي لعناصر الأتربة النادرة بدأ فعلاً في أواخر القرن التاسع عشر، إذ استعملت في تصنيع مصابيح الفلورسنت (Fluorescent lamps)، وكذلك استعملت في ما بعد في ليزرات الحالة الصلبة مثل (Nd<sup>3+</sup>: YAG Laser)، وفي صناعة النبائط المغناطيسية (Magnatic device)، وأيضاً في صناعة مضخمات الليف البصري (Optical fiber amplifiers) وليزرات الألياف البصرية (Optical fiber Lasers) وتحديداً العناصر (Pr<sup>3+</sup>، OH<sup>3+</sup>، Ce<sup>3+</sup>، Gd<sup>3+</sup>، Bi<sup>3+</sup>، Er<sup>3+</sup>، Yb<sup>3+</sup>، Nd<sup>3+</sup>، Tm<sup>3+</sup>) [11,12].

تُعدّ عناصر الأتربة النادرة ثلاثية التكافؤ (Trivalent)، إذ يكون ترتيبها الإلكتروني على النحو الآتي [11,12].-

([Xe] 4f<sup>n-1</sup> 5S<sup>2</sup> 5P<sup>6</sup> 6S<sup>0</sup>) حيث ان الترتيب الإلكتروني لل [Xe] هو كالآتي: - (1S<sup>2</sup>, 2S<sup>2</sup>, 2p<sup>6</sup>, 3S<sup>2</sup>, 3p<sup>6</sup>, 4S<sup>2</sup>, 3d<sup>10</sup>, 4p<sup>6</sup>, 5S<sup>2</sup>, 4d<sup>10</sup>, 5p<sup>6</sup>) مما يجعلها ذات مستويات طاقة ثابتة، بالرغم اختلاف المضيف (Host)، وكذلك الانتقالات فيها تكون حادة (Sharp lines) وذات حزمة امتصاص قوية (Strong absorption)

(band)، ومثل هذه الخواص ج علتها أفضل المرشحات استعمالاً كأوساط فعالة لليزرات [11,12].

## The Hosts

### (1-6) المضيفات

أن اول استعمال للمضيفات مع عناصر الأتربة النادرة كان عام (1961) من قبل الباحثين (L.F.Johnson and K.Nassau) في ليزر ( $Nd^{3+}: CaWO_4$ )، ومنذ ذلك الوقت أصبح شائعاً استعمال المضيفات البلورية أو الزجاجية (Crystal or glass) في الكثير من التطبيقات مثل الرقائق المايكروية (Microchip) أو دليل الموجة (Waveguide).....الخ [7].

وتعدّ أكثر المضيفات شيوعاً في الليزرات التي يكون وسطها الفعال مطعماً بعناصر الأتربة النادرة هي البلورات أو الزجاج، إذ إن المضيفات البلورية تكون صلبة (Solid) وذراتها أو جزيئاتها أو أيوناتها مرتبة بنحوٍ منتظم في فضاء ثلاثي الأبعاد، ومن الأمثلة الشائعة لاستعمال هذه المضيفات في الليزرات ليزر الياقوت ( $Cr^{3+}: Al_2O_3$ ) وليزر الراديميوم ( $Nd^{3+}: Y_3Al_5O_{12}$ ) [7,9].

إذ إن الوسط الفعال يتكون من بلورة شفافة قد تكون مركبة من مواد عازلة مطعمة بأيونات مادة غريبة تحل محل بعض الأيونات الأصلية للبلورة، ويعود للأيونات الشائبة وجود مستويات الطاقة التي تشترك في عمليتي الانبعاث والامتصاص في حين تؤدي البلورة الأصلية وظيفة مهمة كوسط مستقر تتوزع فيه الأيونات الفعالة، وهي بذلك لها الأثر في تحديد قدرة الشعاع الخارج عن طريق خواصها الفيزيائية المتمثلة في معاملي التوصيل والتمدد الحراريين، وعلى مقدار تقبلها لعدد الأيونات الغريبة فضلاً عن أن نوع البلورة قد يؤثر في الطول الموجي للشعاع الليزري

الخارج، فقد وجد أن بلورات مختلفة مطعمة بالأيونات الفعالة نفسها تعطي انبعاثاً ليزرياً ذا أطوال موجية مختلفة [9,13].

## الفصل الأول

## الألياف البصرية

إن العوامل الم

(أ) قوى كولوم (Coulomb Forces) العاملة على الإلكترونات في الأغلفة غير المشبعة [13].

(ب) المجال البلوري الداخلي (crystal internal field) [13].

(ج) الاقتران بين عزم برم الإلكترون وعزمه الدوراني، الذي ينشأ عن تداخل المجال المغناطيسي المتولد من دوران الإلكترون مع عزمه المغناطيسي [13].

تعدّ قوة كولوم بين الإلكترونات المؤثر الأكبر، إذ تعمل على شطر المستوى الإلكتروني إلى مستويات متعددة، ويكون تأثير المجال البلوري بالنسبة إلى العناصر الانتقالية كبيراً لأن الإلكترونات الثلاثة في المستوى غير المشبع غير معزولة، في حين لا يكون للتداخل بين عزم البرم والعزم الدوراني سوى تأثير قليل، أما أيونات الأتربة النادرة فإن الصورة معكوسة تماماً؛ إذ إن تأثير تداخل عزم البرم مع العزم الدوراني يكون أكبر من المجال البلوري؛ إذ يعمل على تحليل انشطار مستوى طاقي معين إلى مستويات متعددة كل منها يحدد بطاقة تعتمد على مجموع العزم الدوراني الكلي [7,13].

يعدّ الزجاج مضيئاً جيداً عملياً لأيونات الأتربة النادرة بسبب خواصه البصرية، الحرارية، والميكانيكية، ومقارنة مع المضيفات البلورية فإن المضيفات الزجاجية ذات كلفة واطئة في التصنيع، وكذلك تتوزع أيونات الأتربة النادرة بانتظام في الزجاج، كما إن وجود عدم التناسق في تركيب الزجاج يجعله ذا حزمة امتصاص وانبعاث واسعة (broad absorption and emission)

(transitions)؛ إذ ان حزمة الامتصاص الواسعة تقلل التفاوت في طول موجة مصدر الضخ ، وحزمة الانبعاث الواسعة تكون مفضلة لتنعيم نتاج الليزر، ويظهر زجاج الاوكسيد (oxide glass) مقاومة عالية للانصهار وقوة تحمل عالية أيضاً، وبسبب خواصها البصرية الجيدة فإن زجاج الاوكسيد أصبحت له تطبيقات واسعة في الالكترونيات البصرية وكذلك في تحسين كفاءة مضخات الليف البصري عند الاطوال الموجية الطويلة [7,14].

### (1-7) ليزرات الليف البصري المطعم بعناصر الأتربة النادرة. ( Rare – earth doped optical fiber lasers)

إن الوسط الفعال (Active medium) في هذا النوع من الليزرات عبارة عن ليف بصري يطعم لب هذا الليف بأحد عناصر الأتربة النادرة مثل ( $Bi^{3+}$ ،  $Er^{3+}$ ،  $Yb^{3+}$ ،  $Nd^{3+}$ ،  $Tm^{3+}$ ،  $Pr^{3+}$ ،  $OH^{3+}$ ،  $Ce^{3+}$ ،  $Gd^{3+}$ )، وأما المضيفات شائعة الاستعمال في هذا النوع من الليزرات هي زجاج (ZBLAN) أو زجاج (Silica)، كما ان تجويف فابري – بيروت (Fabry – perot cavity) أو التجويف الحلقي (Ring cavity) هو أكثر أنواع التجاويف شائعة الاستعمال في هذه الليزرات، ويُعدّ ليزر شبه الموصل (GaAlAs) مصدراً كافياً وغير مكلف عند استعماله كمصدر ضخ لهذه الليزرات [15].

ويُعدّ ليزر الليف البصري بديلاً ناجحاً لليزرات الحالة الصلبة في الكثير من التطبيقات الصناعية او الطبية؛ لأنه محصن ضد التغيرات البيئية، وذو قابلية عالية على تشتيت الحرارة المتولدة عند تشغيله، وقدرة خرجة مناسبة فعلاً لمثل هذه التطبيقات، وذو استقراره عالية نسبياً عند طول موجي معين، وان عملية الترسيف الضوئي لمرايا تجويفه الرنيني تكون دقيقة جداً وسهلة الى حد ما، كما انه ذو سعة ضوضاء واطئة نسبياً وكلفة صناعته قليلة، وفضلاً عن ذلك يغطي طيف انبعاثه يغطي مدى واسعاً من الطيف الكهرومغناطيسي [15,16].

ويبين الجدول رقم (1-1) مدى الأطوال الموجية لليزر الليف البصري و المطعم بعدد من عناصر الأتربة النادرة [14].

نوع ليزر الليف البصري	طول موجة الانبعاث الليزرية (μm)
Nd <sup>3+</sup>	0.3
Er <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup> , Pr <sup>3+</sup>	0.4
Nd <sup>3+</sup> , Yb <sup>3+</sup>	1
Bi <sup>3+</sup>	1.3
Pr <sup>3+</sup>	1.4
Er <sup>3+</sup>	1.5
Tm <sup>3+</sup> , Ho <sup>3+</sup>	2
Er <sup>3+</sup>	3

الجدول رقم (1-1) الاطوال الموجية الليزرية لبعض عناصر الأتربة النادرة [14].

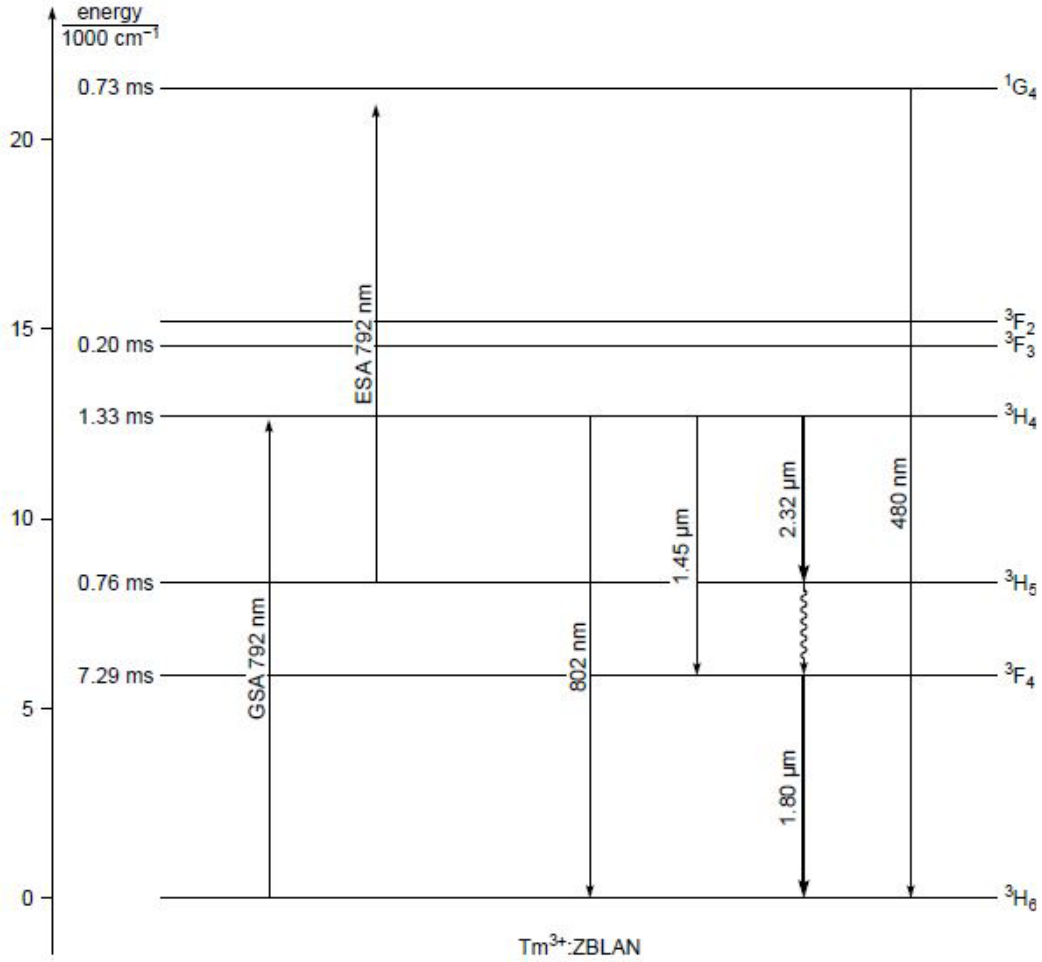
(1-8) ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم (TDFL) (Thulium – doped) (optical fiber laser)

عنصر الثوليوم ( $Tm^{3+}$ ) من عناصر الاتربة النادرة عدده الذري (69) اكتشف الكيميائي السويدي (P.Th.cleve)، وأن اول ليزر ليف بصري مطعم بالثوليوم أعلن عام (1988) من قبل (Southampton)، وهو عبارة عن ليف بصري أحادي النمط، ليه مطعم بالثوليوم، واستعمل ليزر النديميوم ( $Nd^{+3}$ -YAG) عند الطول الموجي ( $1.064\mu m$ ) كمصدر للضخ، و يُعدّ ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم ذا كفاءة جيدة مقارنة مع ليزرات الليف البصري الأخرى<sup>[15]</sup>.

## الفصل الأول

## الألياف البصرية

إن الشكل (1-4) يوضح مستويات الطاقة والأطوال الموجية الليزرية عند قدرة ضخ (792nm) لليزر ليف زجاج ZBLAN المطعم بالثوليوم إذ إن تركيب زجاج ZBLAN هو ( $ZrF_4 - BaF_2 - LaF_2 - AlF_3 - NaF$ ) وبتراكيز هي: ( $ZrF_4$  (53%) ، ( $BaF_2$  (20%) ، ( $LaF_2$  (4%) ، ( $AlF_2$  (3%) ، ( $NaF$  (20%)<sup>[17]</sup>.



الشكل (1-4) بعض الانتقالات لأيون الثوليوم في مضيف زجاج (ZBLAN) [12]

تثار أيونات الحالة الأرضية (Ground state) مباشرة في أثناء امتصاصها لطول موجة الضخ (792nm) بلستعمال ليزر شبه الموصل (GaAlAs) [11,15].

إن الانتقال ( ${}^3H_5 \rightarrow {}^1G_4$ ) المتجه نحو الأعلى ليس مؤثراً في الثوليوم لعدم تكافؤ طاقة امتصاص الحالة المثارة (ESA) للضخ مع طاقة امتصاص الحالة الأرضية



(GSA) للضخ، ويعود السبب في ذلك الى ان فرق الطاقة بين المستويين  $^3H_5$  و  $^3F_4$  يكون بحدود ( $2400cm^{-1}$ ) مما يجعل احتمالية الانحلال السريع غير الم شع أكبر بكثير من احتمالية حدوث الانتقال ( $^1G_4$   $^3H_5$ ) [11,15].

### (1-9) الدراسات السابقة (Previous studies)

تم استغلال العديد من عناصر الأتربة النادرة مثل الأربيوم  $Er^{+3}$ ، والنيوديميوم  $Nd^{+3}$ ، واليتربيوم  $Yb^{+3}$ ، والثوليوم  $Tm^{+3}$ ، والباراصوديوم  $Pr^{+3}$ ، والهولميوم  $Ho^{+3}$ ، في تصنيع ليزرات الألياف البصرية لها قابلية التشغيل في مدى من الأطوال الموجية  $(0.4-4)\mu m$  [18]، [19].

وأصبحت مضخات الألياف البصرية المطعمة بعناصر الأتربة النادرة متوافرة تجارياً عام 1986 بعد أن تمكن عدد من الباحثين في جامعة ساوث أمبتن البريطانية من انتاج مضخم الليف البصري المطعم بالأربيوم، إذ كان ذلك أشبه ما يكون بثورة في مجال الاتصالات [5].

في عام (1989) تمكن كل من (P.J.Suni et.al.) من تشغيل ليزر ليف زجاج (silica) المطعم بالثوليوم، إذ استعمل ليزر (Nd-YAG) المستمر كمصدر لضخ هذا الليزر، وتمكن الباحثون من الحصول على انبعاث ليزري مستمر عند الطول الموجي ( $2\mu m$ )، إذ كانت قدرة خرج هذا الليزر بحدود ( $50mw$ ) [13].

وفي عام (1996) استعمل كل من (R.c.sharp et.al.) تقانة أقفال الصيغة المعترض (Passive mode locking) لليزر ليف زجاج السليكا (Silica) المطعم بالثوليوم، وكان مصدر الضخ ليزر شبه الموصل (GaAs) وبقدرة ( $5mw$ )، إذ حصلوا على نتاج ليزري نبضي (P) عند الطول الموجي ( $1.9\mu m$ )، وكان أمد النبضة بحدود ( $190fsec$ ) وطاقة بحدود ( $20PJ$ ) [20].

وفي عام (1999) قدم كل من (F.Brunet et.al.) أنموذجاً نظرياً معتمداً على معادلات المعدل لليزر زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذي الانبعاث الليزري عند الطول الموجي ( $0.455\mu\text{m}$ )، الذي يضخ بطولين موجيين هما ( $0.645\mu\text{m}$  and  $1.064\mu\text{m}$ )، إذ أكد هذا الأنموذج الاعتماد الشديد لكل من قدرة عتبة الليزر ( $P_{th}$ ) وقدرة الخرج ( $P_{out}$ ) على قدرة الضخ ( $P_p$ )، وطول الليف البصري ( $L$ )، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري ( $R_2$ )، وتركيز الثوليوم ( $N$ ) [21].

وفي عام (2001)، استعمل كل من (J.Xu et.al.) تجويفاً رنينياً من النوع الحلقي (ring cavity) لليزر ليف زجاج (silica) ثنائي القشرة (double-clad) المطعم بالثوليوم، إذ كان طول هذا الليف البصري ( $80\text{cm}$ ) ومصدر الضخ ذا قدرة ( $11.5\text{W}$ ) فكان الانبعاث الليزري مستمراً وبطول موجة ( $2\mu\text{m}$ ) وذا قدرة خرج ( $2.7\text{W}$ ) وكفاءة بحدود ( $32\%$ ) [22].

في العام نفسه تمكن (Z.Erlang ung) من استعمال ليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم وبطول يتغير من ( $10\text{cm}$ ) لغاية ( $200\text{cm}$ )، وكان مصدر الضخ هو ليزر (TiSa) بقدرة ضخ ( $1.4\text{W}$ )، وحصل على انبعاث ليزري مستمر عند الطول الموجي ( $2.3\mu\text{m}$ ) وكفاءة بحدود ( $26\%$ ) [12].

وفي عام (2005) استعمل (J.wu) ليزر ليف زجاج (germanat) المطعم بالثوليوم ثنائي القشرة وبطول ( $40\text{cm}$ )، إذ كان التجويف الرنيني المستعمل هو تجويف فابري – بيروت، وتمكن من الحصول على انبعاث ليزر مستمر عند الطول الموجي ( $1.9\mu\text{m}$ ) بقدرة خرج ( $4\text{W}$ ) وكفاءة بحدود ( $58\%$ ) [23].

وفي عام (2007) تمكن كل من (J.G eng et.al.) من استعمال ليزر ليف زجاج (germanat) المطعم بالثوليوم بطول ( $2\text{cm}$ )، إذ كان مصدر الضخ هو ليزر (Nd –YAG) عند الطول الموجي ( $0.8\mu\text{m}$ ) فحصلوا على انبعاث ليزري مستمر عند الطول الموجي ( $2\mu\text{m}$ ) بقدرة خرج ( $50\text{mw}$ ) وكفاءة بحدود ( $35\%$ ) [24].

وفي عام (2008) استعمل كل من (M.A.Solodyankin et.al.) تقانة أقفال الصيغة الفعال (Active mode locking) بتجويف رنيني حلقي لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم ومصدر ضخ هو ليزر (Er-doped fiber) بطول موجي ( $1.57\mu\text{m}$ )، إذ حصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي ( $1.93\mu\text{m}$ )، وكان أمد النبضة ( $1.32\text{Psec}$ ) ومعدل قدرة ( $3.4\text{mw}$ ) [25].

وفي العام نفسه تمكن كل من (B.Richards et.al.) باستعمال ليزر ليف زجاج (tellurite) المطعم بالثوليوم بمصدر ضخ هو ليزر ( $\text{Er}^{+3}/\text{Yb}^{+3}$ -doped silica fiber) بطول موجي ( $1.56\mu\text{m}$ )، فحصلوا على انبعاث ليزري مستمر عند الطول الموجي ( $2\mu\text{m}$ ) بقدرة خرج ( $280\text{mw}$ ) وكفاءة بحدود ( $76\%$ ) [26].

وفي عام (2009) أستخدم كل من (Q.wang et.al.) تقانة أقفال الصيغة المعترض لليزر ليف زجاج (silica) المطعم بالثوليوم بطول ( $30\text{cm}$ ) فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي ( $2\mu\text{m}$ ) بأمد نبضة ( $1.5\text{Psec}$ ) وطاقة ( $0.7\text{nJ}$ ) أما الكفاءة فكانت بحدود ( $68.8\%$ ) [27].

وفي العام نفسه تمكن كل من (P.F.Moulton et.al.) من استعمال ليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم متعدد النمط ذي نصف قطر لب الليف ( $35\mu\text{m}$ ) وطول ( $150\text{cm}$ )، ومصدر ضخ ذي قدرة ( $500\text{W}$ ) عند الطول الموجي ( $0.79\mu\text{m}$ )، فحصلوا على انبعاث ليزري مستمر عند الطول الموجي ( $1.8\mu\text{m}$ ) بقدرة خرج ( $300\text{W}$ ) بكفاءة ( $64.5\%$ ) [28].

وفي عام (2010) استعمل كل من (T.S.Mecomb et.al.) تقانة أقفال الصيغة المعترض لليزر ليف (Silica) المطعم بالثوليوم ذي طول ( $15\text{cm}$ ) ونصف قطر لب الليف ( $10\mu\text{m}$ )، بتجويف حلقي ومصدر ضخ بقدرة ( $1.5\text{W}$ ) عند الطول الموجي ( $1.55\mu\text{m}$ )، فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي ( $2\mu\text{m}$ ) بأمد نبضة ( $5\text{Psec}$ ) وطاقة بحدود ( $32\text{PJ}$ ) [29].

وفي عام (2011) قدم كل من (P.Peterka et.al.) أنموذجاً نظرياً لدراسة الانبعاث الليزري من ليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم بطريقة ضخ من نوع (Upconversion) عن طريق ليزر (Nd<sup>3+</sup> – YAG) عند الطول الموجي (1.064µm) بقدرة ضخ (5W)، إذ كان الانبعاث الليزري المستمر الأعلى شدة هو (0.81µm) وقدرة خرجة بحدود (2W) [30].

وفي العام نفسه استعمل كل من (J.Ding et.al.) ليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم أحادي النمط؛ إذ قطر لب الليف (1.5µm) فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي (2µm) بأمد نبضة (1.5nsec) وقمة قدرة (Peak Power) بحدود (8Kw) [31].

وفي عام (2012) استعمل كل من (M.Zhang et.al.) تقانة أقفال الصيغة الفعال عن طريق استعمال بوليمر – كرافيت لتحقيق عملية الامتصاص الإشعاعي لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم، فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي (1.94µm) بأمد نبضة (3.6nsec) وطاقة (0.4nJ) [32].

وفي العام نفسه استعمل كل من (F.Wang et.al.) تقانة التنشيط لقفل الصيغة (Active mode-locking) باستعمال البلورة (Cr-ZnSe) لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم، وحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي (1.884µm) بأمد نبضة (2.3µsec) وذو طاقة بحدود (70nJ) [33].

وفي عام (2013) تمكن كل من (K.Ramaswamy et.al.) من استعمال ليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ثنائي القشرة إذ نصف قطر لب الليف (8µm)، ونصف قطر الغلاف العاكس (125µm)، ومصدر الضخ ليزر (Yb<sup>3+</sup> – doped fiber) بطول موجي (1.064µm) وقدرة ضخ (656mw)، فحصلوا على انبعاث ليزري مستمر عند الطولين الموجيين (0.81µm) و(1.48µm) بقدرة خرج (25mw) وكفاءة بحدود (15%) [34].

وفي العام نفسه استعمل كل من (Q.Huang et.al.) تقانة التنشيط لأقفال الصيغة عن طريق (Bragg grating) لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم ثنائي القشرة ومصدر ضخ بقدرة (11.6W) عند الطول الموجي (0.793µm)، فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي بطول موجي (1.996µm) بأمد نبضة (150nsec) وطاقة بحدود (2µJ) بمعدل تكرار (30KHz) [35].

وفي عام (2013) تمكن كل من (P.Wan.et.al.) من استعمال ليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم للحصول على أنبعاث نبضي عند الطول الموجي (2μm) بطاقة مقدارها (156μJ) وأمد نبضة مقدارها (320 Psec) بمعدل تكرار (2.5MHz) [36].

وأيضاً في عام (2013) استعمل (C.W.Rudy) تقانة أقفال الصيغة المعترض باستعمال تجويف رنيني بصورة رقم (8) لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم للحصول على انبعاث نبضي عند الطول الموجي (2.034μm) وأمد نبضة بحدود (1.5Psec) وطاقة مقدارها (6.3PJ) بمعدل تكرار (10.4MHz) [37].

وفي عام (2014) استعمل كل من (Y.Tang et.al.) تقانة مفتاح عامل النوعية الفعال (Passively Q-switching) لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم بمصدر ضخ ذي قدرة (5.2W)، فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي (2μm) بأمد نبضة (320nsec) وطاقة بحدود (18μJ) بكفاءة (26%) [38].

وفي العام نفسه تمكن كل من (P.Wan et.al.) من استعمال تقانة التنشيط لأقفال الصيغة عن طريق خلية صوتية – بصرية (Acousto – optic) لليزر ليف زجاج (Silica) المطعم بالثوليوم، بمصدر ضخ هو ليزر (Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-doped fiber) فحصلوا على انبعاث ليزري نبضي عند الطول الموجي (2μm)، بأمد نبضة (780fsec) ومعدل تكرار (100KHz) وطاقة بحدود (156μJ) وكفاءة (26%) [39].

وأيضاً في عام (2014) تمكن (M.Gaponenko.et.al.) من استعمال ليزر (GaAs) بضخ (Tm: Kyw microchip Laser) والحصول على انبعاث مستمر (cw) بطول موجي (1.94μm) وقدرة خرج (1W) وكفاءة بحدود (71%) [40].

## (Aim of the work)

## (1-10) الهدف من هذا العمل

إن الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو استعمال معادلات المعدل لاشتقاق علاقة رياضية تربط قدرة الخرج الليزري بقدرة الضخ لليزر الليف البصري الذي يعمل وفقاً لخطة الضخ ذات ثلاثة مستويات، التي فيها يصل الضخ مباشرة الى مستوى الليزر العلوي.

وفضلاً عن ذلك تم حساب قدرة الخرج الليزري وفقاً لهذه العلاقة الرياضية بواسطة برنامج (Matlab,8.1) عن طريق اختيار ليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالتوليوم كمثال أنموذجي لليزرات الليف البصري، الذي يكون فيه الضخ بمصدر ذي طول موجي (0.79μm) بين المستويين  $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$  بقدرات ضخ مختلفة للحصول على انبعاث ليزري بطول موجي (2.32μm) بين المستويين  $^3H_4 \rightarrow ^3H_5$ .

كذلك تم معرفة تأثير العوامل الرئيسة في تصميم ليزرات الليف البصري في قدرة الخرج الليزري، وهي تركيز التوليوم في لب الليف البصري ونصف قطر لب الليف البصري، وطول الليف البصري، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري، وقدرة الضخ، ونوع الليف البصري.

## (Thesis Layout)

## (1-11) تنظيم الرسالة

تتضمن الرسالة أربعة فصول: -

يتناول الفصل الأول، الليف البصري، وأنواعه، الخسائر الشائعة فيه، واستعمال عناصر الأتربة النادرة في تطعيم الليف البصري، وتأثير المضيفات في إنتاج ليزر الليف البصري، وليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم، ومستويات الطاقة الخاصة به كمثال أنموذجي لهذه الليزرات، وأخيراً استعراض لعدد من الدراسات السابقة التي طورت هذا النوع من ليزرات الليف البصري.

أما الفصل الثاني فقد تناول الأنموذج النظري، واعتماد معادلات المعدل لنظام ليزر الليف البصري ذات ثلاثة مستويات، وتأهيل المستويات الثلاثة بدلالة تركيز الثوليوم في الليف البصري، والكسب عند العتبة، وتغيير قدرة الضخ في طول الليف البصري بتأثير تغيير تأهيل المستويين والذي يحدث بينه ما الانبعاث الليزري، وقدرة الضخ، وعتبة قدرة الضخ، والكفاءة وقدرة الضخ الممتصة فعلاً من الليف البصري، وقدرة الخرج الليزري، و وضعت التفاصيل الدقيقة لاشتقاق هذه المعاملات بصيغة ملاحق في نهاية الرسالة.

في حين تناول الفصل الثالث، النتائج والمناقشة، إذ نجد فيه جدولاً يتضمن جميع المعاملات التي تتضمنها معادلة القدرة الخارجة الخاصة بليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذي انبعاث الليزر عند الطول الموجي  $(2.32\mu\text{m})$  ومصدر ضخ بطول موجي  $(0.790\mu\text{m})$ ، جداول تبين تأثير كل من تركيز الثوليوم، ونصف قطر لب وطول الليف البصري، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري على كل من الكسب وقدرة الضخ عند العتبة، والكفاءة، والقدرة الممتصة فعلاً، الرسوم البيانية التي توضح تأثير المعاملات آنفة الذكر في قدرة الخرج الليزري، فضلاً عن حساب قدرة الخرج الليزري لثلاثة تصاميم عملية تختلف من ناحية نصف قطر لب وطول الليف البصري، وقدرة الضخ.

أما الفصل الرابع، فقد تناول الاستنتاجات والمشاريع المستقبلية المقترحة، وفيه نجد جميع الاستنتاجات التي تم التوصل إليها نتيجة لتأثير المعاملات الأساسي ة في

تصميم ليزر الليف البصري في قدرة الخرج الليزري، عدد من المقترحات التي  
نجدها مشاريع مستقبلية مكملة لهذه الدراسة.



## (Introduction)

### (2-1) مقدمة

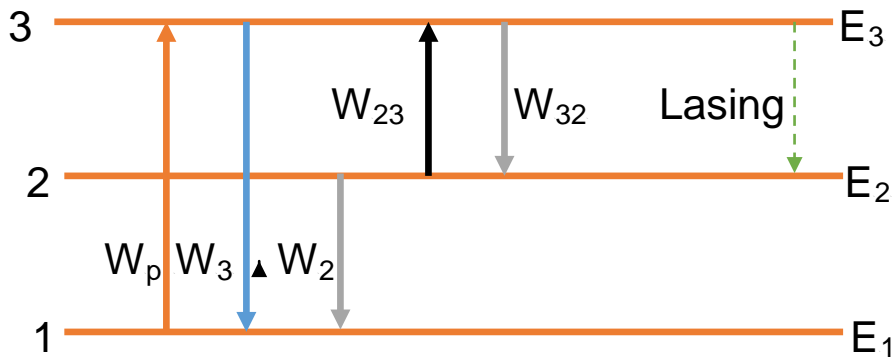
تضمن هذا الفصل تبني معالجة نظرية لنظام ليزري مستمر الموجة ذي ثلاثة مستويات (Quasi-Three-level system) يمتاز بأن مستوى الليزر السفلي (1) هو نفسه المستوى الارضي مع وجود مستوى ثالث (3) عريض لخزن الايونات بعد ضخها بالطاقة [41]. والتجويف الرنيني المستعمل في هذا الانموذج النظري هو تجويف فابري - بيروت يتألف من مرأتين مستويتين متقابلتين بنحو متوازٍ توضع المادة الفعالة التي هي (Tm<sup>+3</sup>-doped fiber) بينهما، فاذا جعلت إحدى المرأتين شفافة جزئياً فإن جزءاً نافعاً من الانبعاث المحفز ذي الاتجاه الموحد والموازي لمحور المرأتين يمثل نتاج الليزر، وقد اعتمدت في الانموذج معادلات المعدل لإيجاد صيغته تقريبية بسيطة تربط بين قدرة الضخ (Pump power) مع قدرة خرج الليزر (Output laser power) [41].

## (Rate equation)

### (2-2) معادلات المعدل

افترض في هذه المعالجة النظرية منظومة ليزر ذات ثلاثة مستويات طاقة، لأن ليزر الليف المشوب بالتولويوم (Tm<sup>+3</sup>-doped fiber laser) يعمل وفقاً لخطة الضخ هذه، إذ يتطلب تحقيق التأهيل العكسي ( $N_3 - N_2 > 0$ ) عملية ضخ طاقي الى المستوى ( $E_3$ ) باعتماد طريقة ضخ مناسبة تحقق الشرط ( $h\nu_p = E_3 - E_1$ )

ويوضح الشكل (2-1) الانتقالات المحتملة نتيجة عملية الضخ هذه.



الشكل رقم (2-1) منظومة ليزر ذات ثلاثة مستويات طاقة

وبصورة عامة يمكن للأيون الموجود في المستوى العلوي للطاقة ان يتخذ انتقالاً تلقائياً (Spontaneous transition) مشعاً كان او غير مشع الى مستوى اوطأ منه، او ممكن لهذا الأيون ان يحفز بواسطة انتقالاً محفز ( Stimulated Transition ) لينتقل الى مستوى طاقة اعلى منه او اوطأ منه [41].

إذا كان ( $N_i$ ) يمثل عدد الايونات لوحدة الحجم في المستوى ( $i$ ) فان معادلات المعدل لخطة الضخ ذات المستويات الثلاثة يعبر عنها كالآتي: - [41]

$$\frac{dN_3}{dt} = N_1 W_p + N_2 W_{23}^i - N_3 w_{32}^i - N_3 (X_p W_p + W_3) \quad (2-1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_3 (w_{32}^i + W_{32}) - N_2 (w_{23}^i + W_2) \quad (2-2)$$

$$N = N_1 + N_{ex} \quad (2-3)$$

$$N_{ex} = \sum_{i=2}^3 N_i \quad (2-4)$$

إذ ان ( $w_{ij}$ ) هي الاحتمالية لوحدة الزمن (Probability per unit time) للانحلال الأيون تلقائياً من المستوى ( $i$ ) الى المستوى ( $j$ ) سواء كان مشعاً او غير مشع

( $W_i$ ) هو معدل الانحلال التلقائي الكلي (Total spontaneous decay rate) من المستوى ( $i$ )

( $W_{ij}^i$ ) هو معدل الانتقال المحفز (stimulated Transition rate) بواسطة الانبعاث او الامتصاص من المستوى ( $i$ ) الى المستوى ( $j$ )

( $N$ ) هو العدد الكلي للأيونات لوحدة الحجم (Number of ions per unit volume)

( $N_{ex}$ ) هو العدد الكلي للأيونات الموجودة في الحالات المثارة (Number of ions per unit volume in Excited states).

( $W_p$ ) معدل الضخ.

( $X_p$ ) النسبة بين معدل الأنبعاث والامتصاص المحفزين بفعل طول موجة الضخ.

في الحالة المستقرة (steady state) فإن [42][43]:

$$\frac{dN_i}{dt} = 0 \quad (2-5)$$

لذلك يمكن كتابة المعادلات (2-1) و (2-2) كالتالي: -

$$N_1 W_p + N_2 W_{23}^i - N_3 W_{23}^i - N_3 (X_p W_p + W_3) = 0 \quad (2-6)$$

$$N_3 (W_{32}^i + W_{32}) - N_2 (W_{23}^i + W_2) = 0 \quad (2-7)$$

أما ( $W_p$ ) فهو معدل الضخ (Pump rate) الذي يمثل معدل الامتصاص الناتج عن الضخ، ويرتبط هذا المعدل بمساحة مقطع الضخ ( $\sigma_p$ ) (Pump cross section) بالعلاقة الآتية [41]: -

$$W_p = \frac{I_p \sigma_p}{h\nu_p} \quad (2-8)$$

إذ إن ( $I_p$ ) هو شدة الضخ (Pump Intensity) و ( $h\nu_p$ ) هي طاقة فوتون الضخ (Pump photon energy)

إذا كان ( $J_i$ ) العدد الكمي للزخم الزاوي الكلي (Total angular momentum quantum number) للمستوى ( $i$ ) فإن تعددية (Degeneracy) المستوى ( $i$ ) يعبر عنها بالعلاقة الآتية [43]: -

$$g_i = 2J_i + 1 \quad (2-9)$$

وبدلالة تعددية المستوى ( $i$ ) فإن النسبة بين معدل الانبعاث والامتصاص المحفزين بفعل الضخ تكون كالتالي [43]: -

$$X_p = \frac{g_1}{g_3} \quad (2-10)$$

## المعالجة النظرية

## الفصل الثاني

وعلى نحو مماثل فإن هذه النسبة بفعل الانبعاث الليزري (*Lasing*) تكون بالصيغة الآتية [43]:

$$X_L = \frac{W_{23}^i}{W_{32}^i} = \frac{g_3}{g_2} \quad (2-11)$$

من أجل حل المعادلات (2-1) – (2-4) لإيجاد تأهيل المستوى (*i*) لا بد من التعرف على نوعين من نسب تفرع الانبعاث التلقائي (*Spontaneous emission branching ratio*) الأولى يعبر عنها بالمعادلة الآتية [41,44]: -

$$\beta_{ij} = \frac{W_{ij}}{W_i} \quad (2-12)$$

إذ يمثل ( $\beta_{ij}$ ) احتمالية ان يسترخي الأيون المثار الموجود في المستوى (*i*) بخطوة واحدة (*Single step*) سواء كان هذا الانتقال مشعاً أم غير مشع إلى مستوى (*j*) أما نسبة التفرع الثانية تعبر عنها كالآتي [44]: -

$$b_{ij} = \sum_{k=j}^{i=1} \beta_{ik} b_{kj} \quad (2-13)$$

وتشمل ( $b_{ij}$ ) احتماليه ان يسترخي الايون المثار الموجود في المستوى (*i*) الى المستوى (*j*) في مجموعة من الخطوات (*multi step*) المتجهة نحو الاسفل.

وباستعمال نسب تفرع الانبعاث التلقائي بين المستويين (*i*) و (*j*)، وبافتراض: --

$$T_i = \frac{1}{W_i} \quad (2-14)$$

$$\Delta N = N_3 - X_L N_2 \quad (2-15)$$

$$W_{32}^i = W^i \quad (2-16)$$

يمكن أن نعبر عن كل من  $(R_p)$  و  $(N_3)$  و  $(N_2)$  و  $(\Delta N)$  بالصيغة الآتية\*  
(الملحق رقم 1،2،3،4) :-

$$R_p = N_1 W_p - N_3 X_p W_p \quad (2-17)$$

$$N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3 \quad (2-18)$$

المعالجة النظرية

الفصل الثاني

$$N_2 = R_p \beta_{32} T_2 + (1 - \beta_{32}) W_i \Delta N T_2 \quad (2-19)$$

$$\Delta N = \frac{R_p T_a}{1 + S} \quad (2-20)$$

ومن أجل كتابة كل من معدل الضخ  $(R_p)$  وتأهيل الحالات المثارة  $(N_2)$  و  $(N_3)$  فضلاً عن تأهيل كل الحالات المثارة  $(N_{ex})$  بدلالة تأهيل الحالة الأرضية  $(N_1)$  تم افتراض الآتي :-

$$T_a = T_3 - \beta_{32} X_L T_2 \quad (2-21)$$

$$T_b = T_3 + (1 - \beta_{32}) T_2 \quad (2-22)$$

$$T_c = X_p T_3 \quad (2-23)$$

$$T_d = T_3 + \beta_{32} T_2 \quad (2-24)$$

$$T_e^2 = (1 + X_L) T_2 T_3 \quad (2-25)$$

حيث أن [41] :-

$$S = W^i T_b = \frac{I}{I_{sat}} \quad (2-26)$$

$$I_{sat} = \frac{h\nu_L}{\sigma_L T_b} \quad (2-27)$$

إذ إن (I) الشدة الليزرية الكلية (Total lasing intensity) في لب الليف البصري (Optical fiber core)، ( $\sigma_L$ ) هي مساحة مقطع الانبعاث المحفز (Stimulated emission cross section) للانتقال الليزري (2  $\rightarrow$  3)، ( $h\nu_L$ ) هي طاقة الفوتون الليزري (Lasing photon energy)، ( $I_{sat}$ ) هي شدة الإشعاع الليزرية (Saturation lasing intensity). \* (الملحق رقم 5،6،7،8)

$$R_p = N_1 \frac{W_p(1+S)}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \quad (2-28)$$

$$N_3 = N_1 \frac{W_p T_3 [1 + W^i (T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \quad (2-29)$$

$$N_2 = N_1 \frac{W_p T_2 [\beta_{32} + W^i T_a + W^i \beta_{32} (T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \quad (2-30)$$

المعالجة النظرية

الفصل الثاني

$$N_{ex} = N_1 \frac{W_p [T_d + W^i T_e^2]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \quad (2-31)$$

كذلك يمكن أن نعبر عن تأهيل الحالة الأرضية ( $N_1$ ) بدلالة العدد الكلي للأيونات في وحدة الحجم ( $N$ ) بافتراض: -

$$T_f^2 = X_L T_c T_2 \quad (2-32)$$

$$N_1 = N \frac{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \quad (2-33)$$

### (Pump intensity)

### (2-3) شدة الضخ

إن نسبة تغير الضخ وتعداد الحالة الأرضية سيتغيران على طول الليف البصري نتيجة لامتصاص فوتونات الضخ، إذ يحدد التغير الحاصل في شدة الضخ مع (z) بالعلاقة الآتية [41]: -

$$dI_p = -I_p (N_1 - X_p N_3) \sigma_p dz \quad (2-34)$$

وبلغتماد المعادلتين (2-29) و (2-33) فإنه يمكن كتابة المعادلة (2-34) كالآتي:

$$\frac{dI_p}{I_p} = - \left( \frac{(1+S) N \sigma_p dz}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \right) \quad (2-35)$$

وبافتراض: -

$$\alpha_p = N \sigma_p \quad (2-36)$$

إذ إن ( $\alpha_p$ ) معامل امتصاص الضخ (Pump absorption coefficient) بأجراء التكامل للمعادلة (2-35) نحصل على: -

$$L \ln \frac{I_p}{I_{p0}} + \frac{\sigma_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]}{h \nu_p (1+S)} (I_p - I_{p0}) = -\alpha_p L \quad (2-37)$$

إذ أن ( $I_p$ )، ( $I_{p0}$ ) هي شدة الضخ عند مدخل الليف ( $z=0$ ) ومخرج الليف ( $z=L$ ) على التوالي.

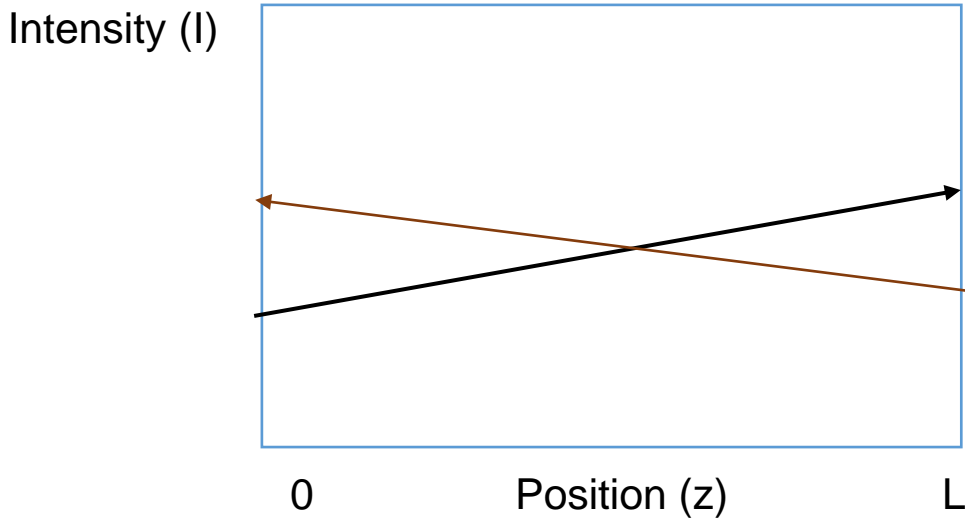
### (Laser intensity)

### (2-4) شدة الليزر

يمكن كتابة شدة النتاج الليزري الكلي عند أي نقطة على طول الليف البصري (z) على أنها حاصل الجمع لشدتين منتشرتين في الليف البصري كالآتي [43,44]: -

$$I(z) = I^+(z) + I^-(z) \quad (2-38)$$

إذ إن  $I^+z$  و  $I^-z$  هما الشدة لحزمتي الليزر المنتشرتين بصورة متضادة في الليف البصري والشكل رقم (2-2) يوضح هاتين الشدتين.



الشكل رقم (2-2) الشدة الليزرية داخل التجويف الرنيني

تضخم الشدة الليزرية المنتشرة باتجاه (+z) وفقاً للعلاقة الآتية: -

$$dI^+(z) = I^+(z) g(z) dz \quad (2-39)$$

إذ إن  $g(z)$  هو معامل الكسب المعتمد على الموقع (z) Position (z) (dependent gain coefficient) والذي يعطى بالمعادلة الآتية: -

$$g(z) = \Delta N(z) \sigma_L \quad (2-40)$$

إذ إن: -

$$\Delta N(z) = N_3 - X_L N_2 \quad (2-41)$$



وبإجراء التكامل للمعادلة (2-39) على طول الليف البصري (L)

$$\int_{I^+(0)}^{I^+(L)} \frac{dI^+(z)}{I^+(z)} = \int_0^L g(z) dz \quad (2-42)$$

وإذ إن: -

$$G = \int_0^L g(z) dz \quad (2-43)$$

نحصل على: -

$$I^+(L) = I^+(0) e^G \quad (2-44)$$

ونتيجة لحدوث التضخيم نفسه للشدة الليزرية  $I^-(z)$  المنتشرة بالاتجاه المضاد (-z)، فإن الشدة  $I^-$  لليزرية الكلية خلال رحلة ذهاب و إياب (around -trip) داخل تجويف الليزر (Laser cavity) تكون كالاتي [43]: -

$$I^-(L) = I^-(0) e^{2G} \quad (2-45)$$

**(The gain)**

**(2-5) الكسب**

ان مقدار الربح لمرحلة ذهاب واياب داخل تجويف الليزر يجب ان يكون أكبر من الواحد لكي ينمو التضخيم، اما إذا كان أقل من الواحد فإن التضخيم سوف يتلاشى لذلك فإن شرط العتبة (Threshold condition) يمكن كتابته كالاتي [43,44]: -

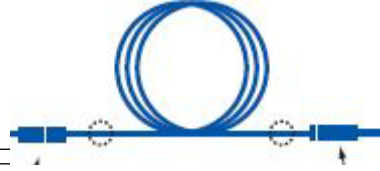
$$R_1 R_2 e^{2(G_{th} - \alpha_L L)} = 1 \quad (2-46)$$

لذلك فإن معامل كسب العتبة (Threshold gain coefficient) نحصل عليه من المعادلة (2-46) بالصيغة الآتية:

$$G_{th} = \alpha_L L + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2-47)$$

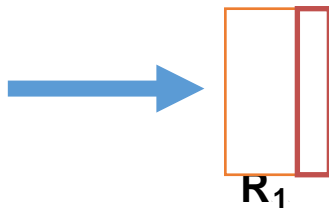
إذ إن  $R_1$ ،  $R_2$  هما انعكاسية مرآيا (Mirrors reflectivity) تجويف فابري – بيروت، (L) طول التجويف،  $\alpha_L$  هو معامل توهين الليف البصري عند طول موجة الليزر Optical fiber attenuation coefficient at laser wavelength، ويوضح الشكل (2-3) والتصميم الأساسي لجهاز

المعالجة النظرية

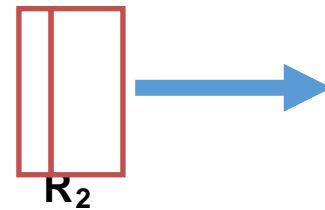


الفصل الثاني

Pumping



Lasing



الشكل رقم (2-3) المكونات الأساسية للجهاز الليزري [13]

ولجهاز ليزر يعمل بموجة مستمرة (cw) فإن قيمة معامل الكسب عند العتبة ( $G_{th}$ ) تساوي القيمة نفسها في حالة الاستقرار وغالبا ما يطلق عليه بمعامل كسب الإشباع ( $G_s$ ) (gain saturation)، إذ يكون الربح مساويا للخسائر في جهاز الليزر [45]. حيث يمثل الحد الأول في المعادلة (48) خسائر الوسط الفعال، والحد الثاني خسائر التجويف الرنيني [45].

ولإيجاد علاقة الكسب مع قدرة الضخ الممتصة في الليف البصري تعتمد المعادلات (2-42) و (2-43) في المعادلة (2-45) نحصل على: -

$$G = \int_0^L (N_3(z) - X_L N_2(z)) \sigma_L dz \quad (2-48)$$

ويعتمد المعادلات (2-20) و (2-28) في المعادلة (2-48) والمقارنة مع المعادلة (2-35) نحصل على\* الملحق (9) :-

$$G = \frac{T_a \sigma_L}{(1+S)h\nu_p} (I_{p0} - I_p) \quad (2-49)$$

### المعالجة النظرية

### الفصل الثاني

ويوضح من المعادلة (2-49) أن كل فوتون يمتص يجب أن يسبب زيادة في مقدار الكسب (G) بغض النظر في أي مكان من الليف البصري امتص هذا الفوتون. وبعتماد المعادلة (2-49) في المعادلة (2-37) وعند  $G = G_{th}$  لحالة الاستقرار (Steady state) وبافتراض [44,45] :-

$$a_1 = \frac{T_c + T_d}{T_a} \quad (2-50)$$

$$a_2 = \frac{T_e^2 + T_f^2}{T_b (T_c + T_d)} \quad (2-51)$$

$$P_{in} = I_{p0} A_{eff} \quad (2-52)$$

إذ  $A_{eff}$  مساحة مقطع لب الليف البصري الفعالة وتحسب في حالة الليف البصري متعدد النمط من المعادلة (1-5) وفي حالة الليف البصري أحادي النمط من المعادلة (1-6).

نحصل على الصيغة النهائية لقدرة الضخ المطلوبة لإنتاج قدرة ضخ معينة كالآتي:

\*الملحق رقم (9,10)

$$P_{in} = \frac{G_{th} h v_p (1+S)A_{eff}}{T_a \sigma_L} \frac{1}{1 - \exp \left[ -\alpha_p L + \frac{\sigma_p}{\sigma_L} a_1 G_{th} (1+a_2 S) \right]} \quad (2-53)$$

ويمكن إيجاد عتبة الضخ (Pump threshold) في حالة الإنتاج الليزري المستمر الموجة (cw) من المعادلة (54) بل اعتماد (S=0) كالاتي: - [41]

$$P_{th} = \frac{G_{th} h v_p A_{eff}}{T_a \sigma_p} \frac{1}{1 - \exp \left[ -\alpha_p L + \frac{\sigma_p}{\sigma_L} a_1 G_{th} \right]} \quad (2-54)$$

## المعالجة النظرية

## الفصل الثاني

ومن المتعارف عليه أن كفاءة جهاز الليزر هي النسبة بين تغير قدرة الخرج الليزري الى تغير قدرة الضخ ب إبقاء كل المتغيرات الأخرى ثابتة، ولكن هذا التعريف لا يكون دقيقاً في حالة تشبع الخرج الليزري، لذلك تعرف في هذه الحالة بأنها النسبة بين قدرة الخرج الليزري الى أقل قدرة ضخ تكفي للحصول على قدرة خرج ليزري ويعبر عنها بالعلاقة الآتية: - [41,44]

$$s = \frac{T v_L}{\delta v_p} \quad (2-$$

η55)

إذ إن: - [41,44]

$$T = 1 - R_2 \quad (2-$$

$$2G_{th} \quad (2- 56)$$

$$\delta=57)$$

إن قدرة الضخ الممتصة فعلاً من الليف البصري تتغير تبعاً لتغير كل من طول الليف (L) ومعامل الأمتصاص ( $\alpha_p$ ) ووفقاً للعلاقة الآتية [41,44]: -

$$P_{abs} = P_p (0) [1 - \exp(-\alpha_p L)] \quad (2-58)$$

لذلك فإن قدرة خرج الليزر يعبر عنها بالعلاقة الآتية [43,45]: -

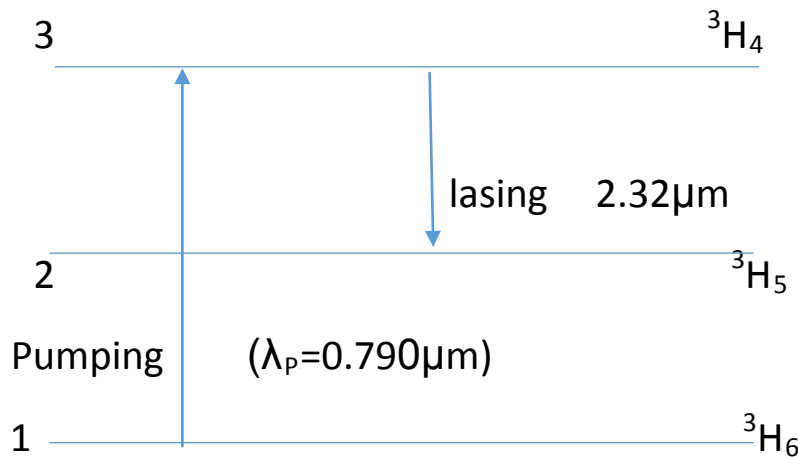
$$P_{out} = \eta_s (P_{abs} - P_{th}) \quad (2-59)$$

(Introduction)

(3-1) مقدمة: -

تم في هذا الفصل تطبيق المعادلة (2-59) التي اشتقت في الفصل الثاني لعلاقة قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ ) بقدرة الضخ  $P_p(0)$  على ليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم، كمثال أنموذجي لليزرات الألياف البصرية التي تعمل وفقاً لخطة الضخ ذات ثلاثة مستويات المعتمدة في هذه المعالجة النظرية باستخدام برنامج الماتلاب (8.1). (الملحق رقم 11)

ويوضح الشكل (3-1) كلاً من مستويات الطاقة، وطول موجة الضخ، وطول موجة الانبعاث الليزري لهذا الليزر [46,47].



شكل رقم (3-1) المستويات الطاقية لليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذات الانبعاث الليزري ( $2.32\mu\text{m}$ )

إن جميع المعاملات التي تتضمنها المعادلة (2-59) الخاصة بليزر ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم ذي الانبعاث الليزري عند الطول الموجي ( $2.32\mu\text{m}$ ) وطول موجة الضخ ( $0.79\mu\text{m}$ ) التي اعتمدت في المحاكاة لحساب ( $P_{out}$ ) مبينة في الجدول (3-1).

إن العلامة (\*) امام بعض المعاملات في الجداول تعني انها تحسب عن طريق هذه الدراسة.

جدول رقم (3-1) المعاملات الأساسية لمعادلة قدرة الخرج الليزري الخاصة بليزر

Parameter	Numerical Value	Unit	Ref.
$\lambda_p$	$0.790 \times 10^{-6}$	m	[12,46]
$\sigma_p$	$3.000 \times 10^{-25}$	$m^2$	[12,46,50,51]
$X_p$	1.444	—	*
$\lambda_L$	$2.320 \times 10^{-6}$	m	[12,47,48]
$\sigma_L$	$3.400 \times 10^{-25}$	$m^2$	[12,48,49]
$X_L$	0.818	—	*
$\alpha_L$	$2.300 \times 10^{-2}$	$m^{-1}$	[12,48,49]
$T_2$	$0.760 \times 10^{-3}$	Sec	[12,49,51]
$T_3$	$1.330 \times 10^{-3}$	Sec	[12,49,51]
$\beta_{32}$	0.033	—	[12,50,51]
$W^i$	24.812	$Sec^{-1}$	*
$N_A$	0.160	—	[12,51,52]
$C$	$3.000 \times 10^8$	m/sec	[43]
$h$	$6.625 \times 10^{-34}$	J.sec	[43]

ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم

ونظراً لأن معادلة قدرة الخرج الليزري (2-59) تتضمن ثلاثة معاملات هي قدرة عتبة الضخ ( $P_{th}$ )، الكفاءة ( $\eta_s$ )، والقدرة الممتصة على امتداد الليف البصري ( $P_{abs}$ )، لذلك سوف نستعرض في الفقرة التالية تغيير هذه المعاملات نتيجة لتغيير

كل من، تركيز الثوليوم في لب الليف البصري (N)، ونصف قطر لب الليف البصري (r)، وطول الليف البصري (L)، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري (R<sub>2</sub>) على التوالي.

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

### (3-2) حساب (P<sub>th</sub>)

المعادلة (2-54) والجدول (3-2) تتبين المعاملات الأساسية التي اعتمدت في حساب (P<sub>abs</sub>، η<sub>s</sub>، P<sub>th</sub>)

الجدول (3-2) المعاملات الخاصة التي اعتمدت في حساب كل من قدرة عتبة الضخ والكفاءة والقدرة الممتصة فعلا

Parameter	Value	Unit
R <sub>1</sub>	1.000	-
R <sub>2</sub>	0.950	-
r	5.000x10 <sup>-6</sup>	m
L	15.000x10 <sup>-2</sup>	m
N	3.000x10 <sup>26</sup>	ion/m <sup>3</sup>

(3-2-a)

تغير كل من (P<sub>th</sub>) (α<sub>p</sub>) نتيجة تغير (N)

يبين الجدول (3-3) تغير (P<sub>th</sub>) نتيجة لتغير معامل التوهين عند طول موجة الضخ (α<sub>p</sub>)، الذي يتغير تبعاً لتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري (N) وفقاً للمعادلة (2-36)، إذ نلاحظ أن (P<sub>th</sub>) تقل بزيادة (N)، ثم تثبت عند قيمة معينة مهما ازدادت قيمة (N).



الجدول (3-3) تغير قدرة عتبة الضخ بتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري

$N \times 10^{24}$ ion/m <sup>3</sup>	$\alpha_p$ (m <sup>-1</sup> )	$P_{th} \times 10^{-3}$ (W)
3	0.900	19.528
77.250	23.175	1.359
151.500	45.449	1.315
225.750	67.725	1.314
300	89.999	1.314

تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير ( $A_{eff}$ )

(3-2-b)

يبين الجدول (3-4) تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير مساحة مقطع لب الليف البصري ( $A_{eff}$ ) التي تتغير تبعاً لتغير نصف قطر لب الليف البصري ( $r$ ) وفقاً للمعادلة (2-54)، نلاحظ من الجدول أن ( $P_{th}$ ) تزداد بزيادة ( $A_{eff}$ ).

الجدول (3-4) تغير قدرة عتبة الضخ بتغير نصف قطر لب الليف البصري

$r \times 10^{-6}$ (m)	$A_{eff} \times 10^{-10}$ (m <sup>2</sup> )	$P_{th} \times 10^{-3}$ (W)
1.5	0.071	0.118
9.875	3.064	5.125
18.250	10.463	17.504
26.625	22.271	37.255
35	38.485	64.379

تغير كل من ( $P_{th}$ ) و ( $G_{th}$ ) نتيجة لتغير (L)

(3-2-c)

يبين الجدول (3-5) تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير معامل كسب العتبة ( $G_{th}$ ) الذي يتغير تبعاً لتغير طول الليف البصري وفقاً للمعادلة (2-54)، نلاحظ من الجدول أن ( $P_{th}$ ) تزداد بزيادة ( $G_{th}$ ).

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

الجدول (3-5) تغير كل من قدرة عتبة الضخ والكسب عند العتبة بتغير طول الليف البصري

$L \times 10^{-2}$ (m)	$G_{th} \times 10^{-3}$	$P_{th} \times 10^{-3}$ (W)
5	26.797	1.224
41.250	35.134	1.587
77.500	43.472	1.963
113.750	51.809	2.339
150	60.147	2.716

تغير ( $P_{th}$ ) نتيجة لتغير ( $R_2$ )

(3-2-d)

يبين الجدول (3-6) تغيي (P<sub>th</sub>) نتيجة لتغيير معامل كسب العتبة (G<sub>th</sub>) الذي يتغير تبعاً لتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري (R<sub>2</sub>) وفقاً للمعادلة (2-54)، نلاحظ من الجدول أن كلا من (G<sub>th</sub>) و (P<sub>th</sub>) يقلان بزيادة (R<sub>2</sub>).

الجدول (3-6) تغير كل من قدرة عتبة الضخ والكسب عند العتبة بتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري

R <sub>2</sub>	G <sub>th</sub> x10 <sup>-3</sup>	P <sub>th</sub> x10 <sup>-3</sup> (W)
0.65	218.842	9.882
0.7	181.787	8.201
0.75	147.291	6.651
0.8	115.022	5.144
0.85	84.709	3.825

(3-3) حساب (η<sub>s</sub>).

تم حساب (η<sub>s</sub>) باعتماد المعادلة (2-55).

تغير (η<sub>s</sub>) نتيجة تغير (L)

(3-3-a)

يبين الجدول (3-7) تغير ( $\eta_s$ )، نلاحظ من الجدول أن ( $\eta_s$ ) تقل بزيادة طول الليف البصري (L).

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

الجدول (3-7) تغير الكفاءة بتغير طول الليف البصري

$L \times 10^{-2}$ (m)	$G_{th} \times 10^{-3}$	$\eta_s\%$
5	26.797	31.769
41.250	35.134	24.229
77.500	43.472	19.583
113.750	51.809	16.431
150	60.147	14.154

تغير ( $\eta_s$ ) نتيجة تغير ( $R_2$ )

(3-3-b)

$R_2$	$G_{th} \times 10^{-3}$	$\eta_s\%$
0.65	218.842	27.229

0.7	181.787	28.097
0.75	147.291	28.898
0.8	115.022	29.605
0.85	84.707	30.149

يبين الجدول (3-8) تغيري  $(\eta_s)$ ، نلاحظ من الجدول أن  $(\eta_s)$  تزداد بزيادة انعكاسية مرآة الخرج الليزري  $(R_2)$ .

الجدول رقم (3-8) تغير الكفاءة بتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري

### (3-4) حساب $(P_{abs})$ .

تم حساب  $(P_{abs})$  باعتماد المعادلة (2-58).

تغير كل من  $(P_{abs})$  و  $(\alpha_p)$  نتيجة تغير  $(N)$

(3-4-a)

يبين الجدول (3-9) تغير  $(P_{abs})$  نتيجة لتغير معامل التوهين عند طول موجة الضخ  $(\alpha_p)$ ، إذ نلاحظ من الجدول زيادة  $(P_{abs})$  بزيادة تركيز الثوليوم في لب الليف البصري.

الجدول رقم (3-9) تغير القدرة الممتصة فعلا بتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري

$N \times 10^{24}$ ion/m <sup>3</sup>	$\alpha_p$ (m <sup>-1</sup> )	$P_{abs}$ (W)
--	----------------------------------	------------------

3	0.900	88.399
77.250	23.175	678.354
151.500	45.449	669.234
225.750	67.725	699.973
300	89.999	699.999

(3-4-b)

تغير ( $P_{abs}$ ) نتيجة تغير (L)

(3-b) يبين الجدول (3-10) تغير ( $P_{abs}$ ) نتيجة لتغير طول الليف البصري (L)، إذ نلاحظ من الجدول أن ( $P_{abs}$ ) تكون ثابتة بزيادة قيمة (L).

الجدول رقم (3-10) تغير القدرة الممتصة فعلا بتغير طول الليف البصري

$L \times 10^{-2}$ (m)	$P_{abs} \times 10^{-3}$ (W)
5	692.224
41.250	700.000

77.500	700.000
113.750	700.000
150	700.000

### (5-3) حساب ( $P_{out}$ )

يتم حساب قدرة خرج الليزر ( $P_{out}$ ) باعتماد المعادلة (2-59).

(3-5-a)

#### تأثير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري (N).

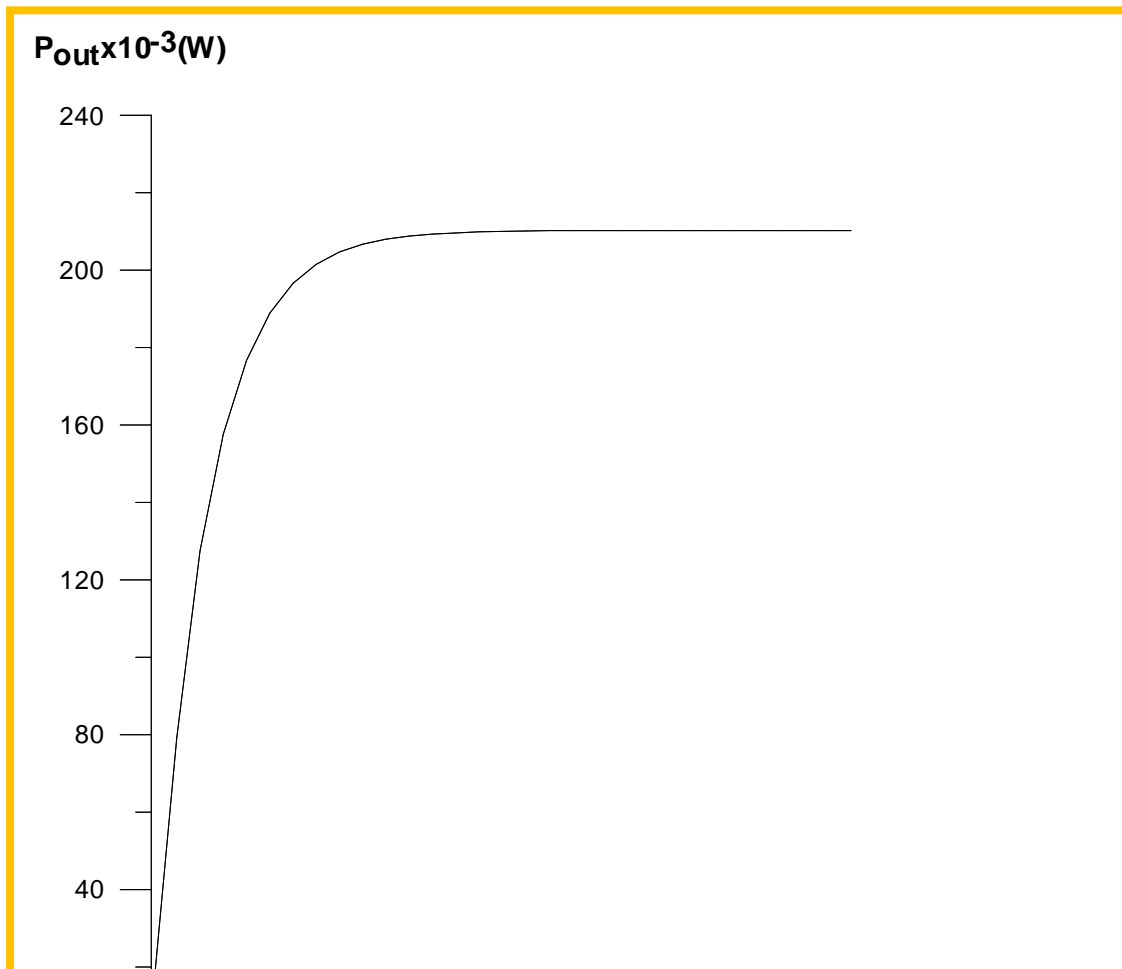
يتطلب الامتصاص الفعال لقدرة الضخ المسلطة على الليف البصري ، أما استعمال ألياف طويلة أو ألياف يكون تركيز عنصر الأتربة النادرة عالي آ ، وهذا واضح في الجدول (3-9) والجدول (3-10) على التوالي، لكّن زيادة طول الليف البصري تسبب انخفاض كفاءة الليزر كما هو واضح في الجدول (3-7)، لهذا يفضل زيادة تركيز الثوليوم في لب الليف البصري بدلاً من زيادة طوله من أجل المحافظة على كفاءة جيدة [51].

وفضلاً عن ذلك تسبب زيادة (N) انخفاض قدرة عتبة الضخ الى حد معين، ثم تثبت عند قيمة معينة مهما ازدادت قيمة (N)، وهذا ما نجده في الجدول (3-3).

يبين الشكل (3-2) تغير قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ ) نتيجة لتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري (N)، إذ نلاحظ من الشكل أن ( $P_{out}$ ) تزداد بزيادة (N)،



وتقريباً تصبح ثابتة نظراً لأن كلاً من  $(P_{th})$  و  $(P_{abs})$  تكون ثابتة عند هذه القيمة، وهذا مبين في الجداول (3-3) و(3-9) على التوالي.



## الشكل رقم (3-2) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير تركيز الثوليوم في لب الليف البصري

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

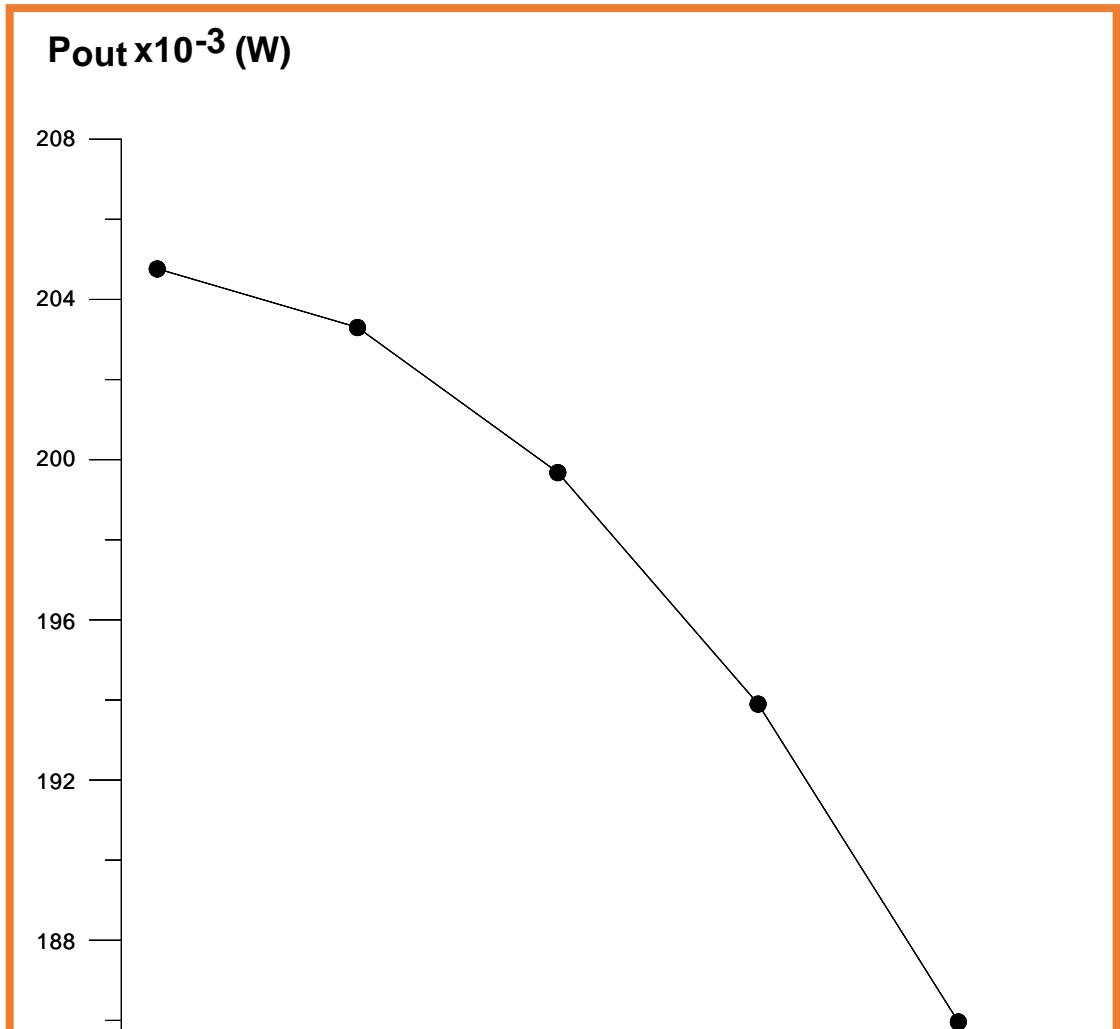
(3-5-b)

### تأثير المساحة الفعالة لب الليف البصري ( $A_{eff}$ ).

نلاحظ من الجدول (3-4) أن عتبة قدرة الضخ ( $P_{th}$ ) تقل كلما قلت ( $A_{eff}$ ) (أو إذا قل نصف قطر لب الليف البصري ( $r$ )).

وهذا يعني عند استعمال ليف بصري يكون لبه ذا نصف قطر صغير جداً ، يكون بالإمكان اعتماد قدرة ضخ واطئة، والعكس صحيح عند استعمال ليف بصري يكون لبه ذا نصف قطر كبير.

ويبين الشكل (3-3) تغير قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ )، نتيجة لتغيير نصف قطر لب الليف البصري، إذ نلاحظ من الشكل أن ( $P_{out}$ ) تقل بزيادة ( $r$ ) وهناك ميل لتزايد شدة تشبع خرج الليزر كلما انخفضت مساحة مقطع لب الليف البصري ( $A_{eff}$ ) عند اعتماد قدرة ضخ ثابتة.



### الشكل رقم (3-3) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة تغير نصف قطر لب الليف البصري

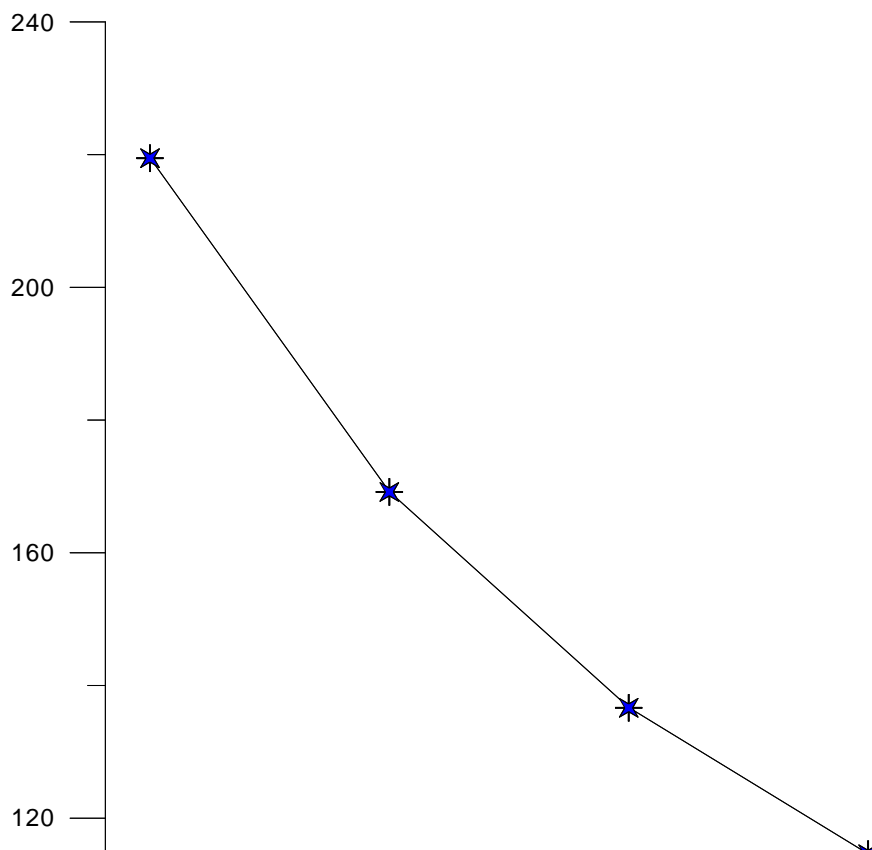
(3-5-c)

#### تأثير طول الليف البصري (L).

نلاحظ من الجدول (3-5) ان قدرة عتبة الضخ ( $P_{th}$ ) تزداد بزيادة طول الليف البصري عندما تكون قدرة الضخ المسلطة على الليف البصري ثابتة، وهذا يعني: بالإمكان استعمال ليف بصري قصير لو كانت قدرة الضخ المسلطة على الليف البصري واطئة، والعكس صحيح أيضاً.

ويبين الشكل (3-4) تغيير قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ )، نتيجة لتغير طول الليف البصري (L)، وهنا لا بد من الإشارة الى أن لكل قدرة ضخ محددة وتركيز التوليد في لب الليف البصري محدد، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري محددة، هناك قيمة محددة لطول الليف البصري لا يمكن اعتماد قيمة أقل منها: لأن ذلك سوف يجعل ( $P_{th} > P_{abs}$ ) وبالتالي تصبح ( $P_{out}$ ) سالبة وفقاً للمعادلة (2-59)، إذ يعود السبب الرئيس في أن ( $P_{th}$ ) والكفاءة ( $\eta_s$ ) تقل بزيادة (L)، كما يبينه الجدول (3-5) و(3-7) على التوالي.

**$P_{out} \times 10^{-3} (W)$**



### الشكل رقم (3-4) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير طول الليف البصري

النتائج والمناقشة

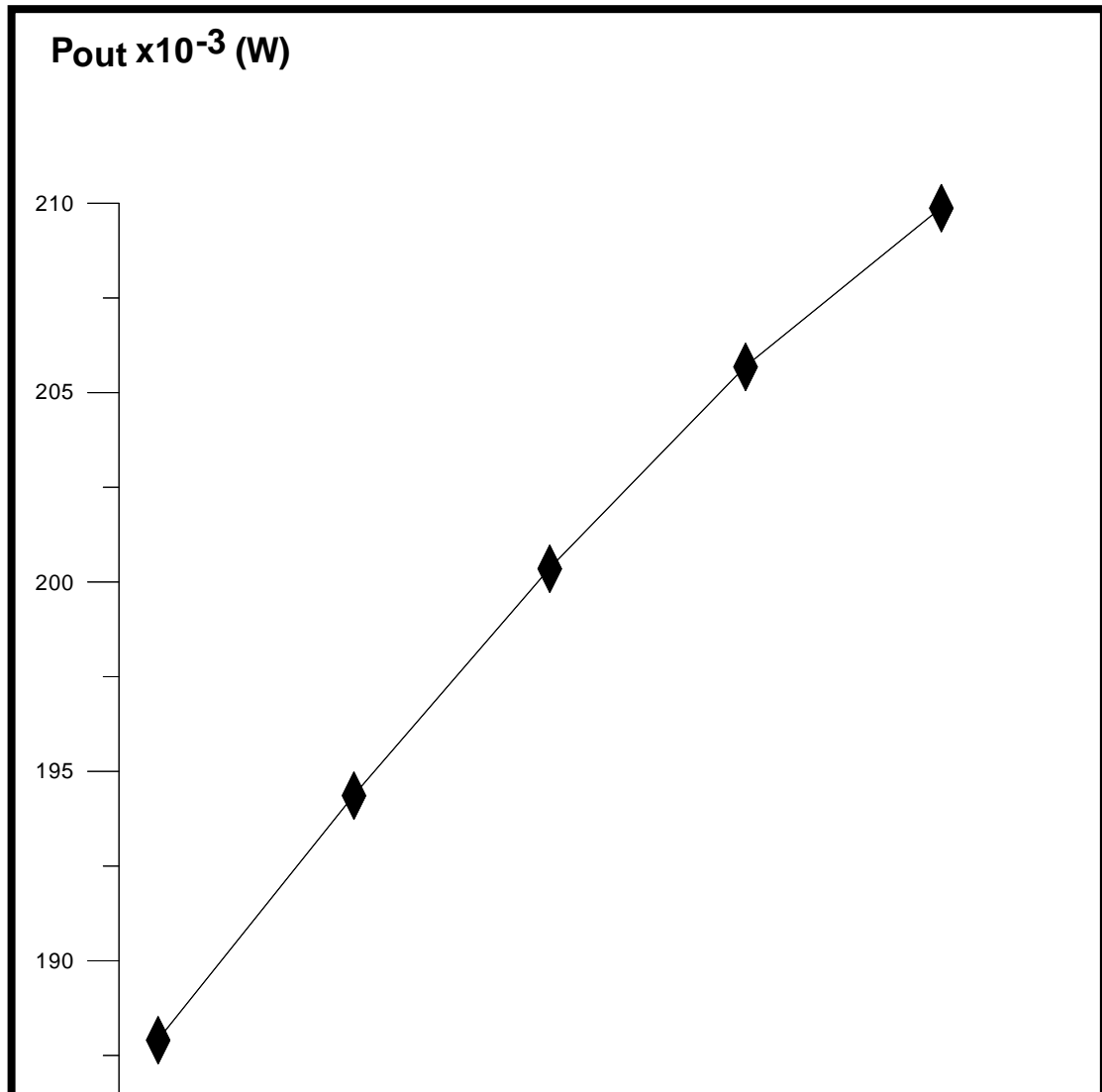
الفصل الثالث

(3-5-d)

#### تأثير انعكاسية مرآة الخرج الليزري ( $R_2$ ).

نلاحظ من الجدول (3-6) أن قدرة عتبة الضخ تقل بزيادة انعكاسية مرآة الخرج الليزري، وأقل قيمة لـ  $(P_{th})$  تم الحصول عليها في حالة ليف زجاج (ZBLAN) المطعم بالثوليوم عند الطول الموجي للانبعاث الليزري ( $2.32\mu m$ ) هي ( $R_2=0.85$ ) بأفترض أن كلاً من قدرة الضخ المسلطة على الليف البصري، وتركيز الثوليوم في لب الليف البصري، وكل من نصف قطر اللب وطول الليف البصري ثابتة عند قيمة محددة.

ويبين الشكل (3-5) تغيي قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ )، نتيجة لتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري ( $R_2$ )، إذ نلاحظ أن ( $P_{out}$ ) تزداد بزيادة ( $R_2$ )، ويعود السبب الرئيس في هذه الزيادة وفقاً للمعادلة (2-59) الى زيادة الكفاءة ( $\eta_s$ ) بزيادة ( $R_2$ ) وهذا ما يبينه الجدول (3-8).



الشكل (3-5) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير انعكاسية مرآة الخرج الليزري.

(3-5-e)

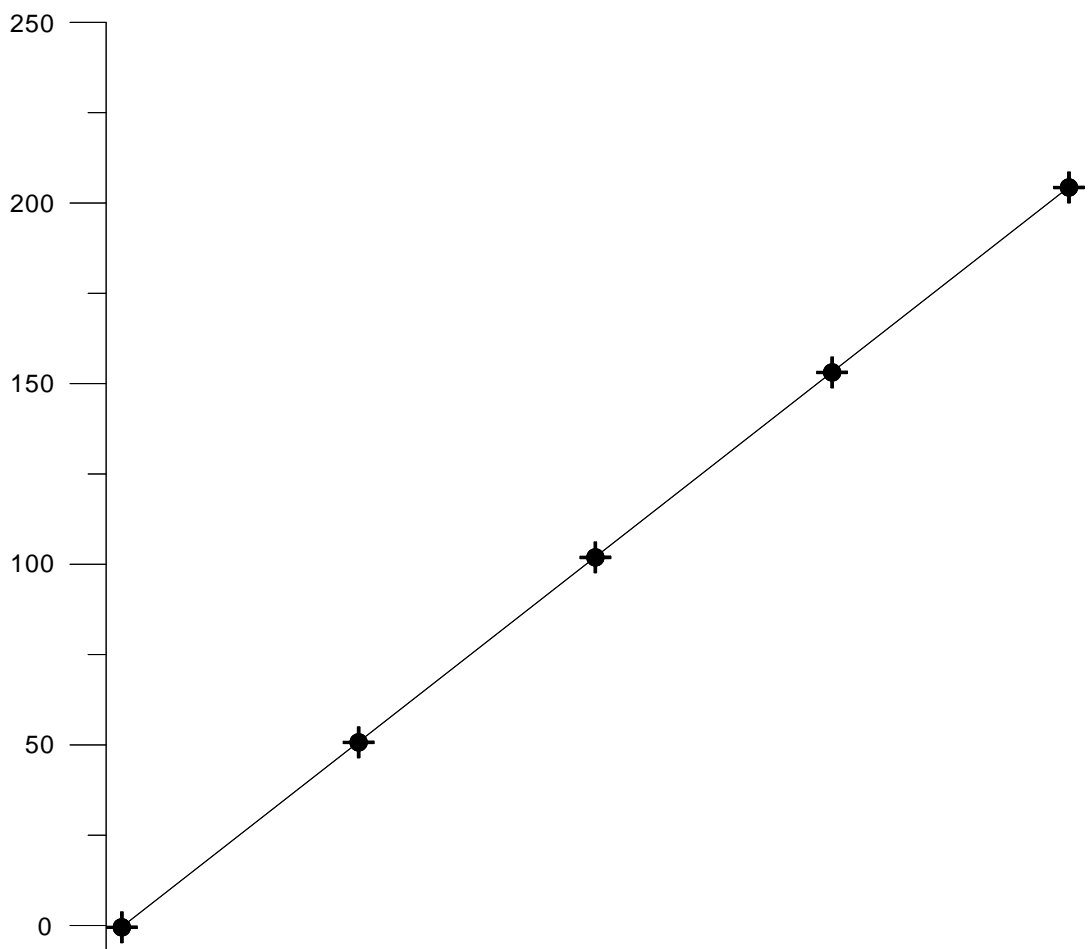
### تأثير قدرة الضخ $P_p(0)$

بافتراض ان كلاً من تركيز الثوليوم في لب الليف البصري  $(N)$ ، نصف قطر لب وطول الليف البصري، انعكاسية مرآة تي التجويف الرنيني ثابتة عند قيمة محددة، فإن تأثير قدرة الضخ  $P_p(0)$  في قدرة الخرج الليزري  $(P_{out})$  يكون باعتماد المعادلة (2-59)، والجدول (3-10).

ويبين الشكل (3-6) تغير قدرة الخرج الليزري  $(P_{out})$  نتيجة تغير قدرة الضخ المسلطة على الليف البصري  $P_p(0)$ ، إذ نلاحظ من الشكل أن  $(P_{out})$  تزداد بزيادة  $P_p(0)$ .



$P_{out} \times 10^{-3} (W)$



## الشكل رقم (3-6) تغير قدرة الخرج الليزرية نتيجة لتغير قدرة الضخ

(3-5-f)

### تأثير نوع الليف البصري.

عادة إما يكون الليف البصري شائع الاستعمال في ليزرات الألياف البصرية أحادي النمط وإما متعدد الأنماط، ويتم تحديد نوع الليف البصري عن طريق التردد المعياري ( $V$ ) إذ يشترط أن يكون  $0 \leq V \leq 2.405$  لكي يكون الليف البصري أحادي النمط<sup>[44]</sup>، ويتم حساب  $V$  عن طريق المعادلة (3-1) إذ يبين الجدول (3-11) قيم  $V$  المناظرة لقيم مختلفة من نصف قطر لب الليف البصري.

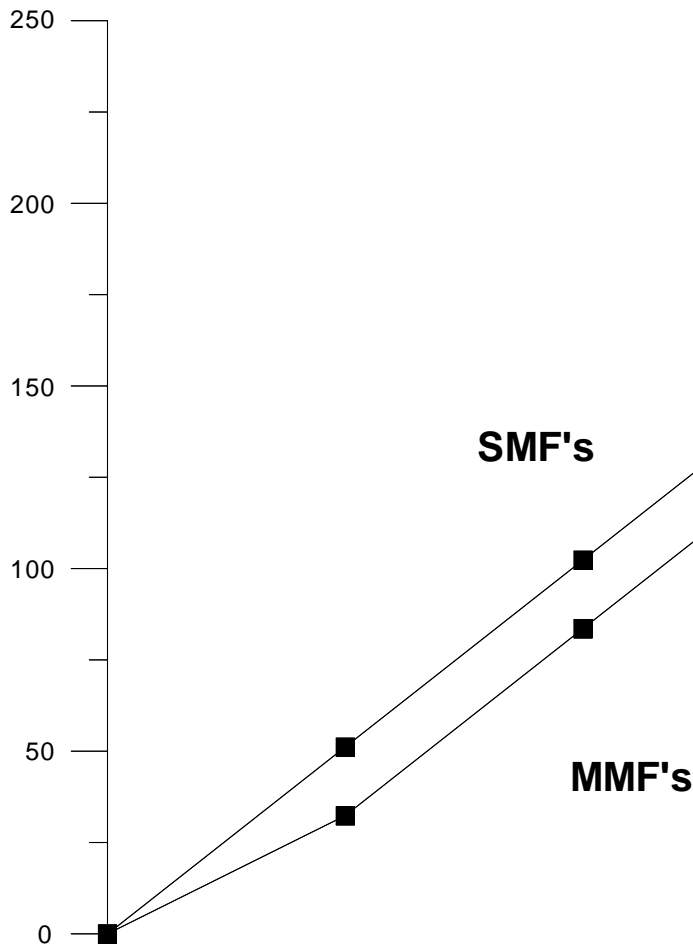
الجدول رقم (3-11) تغير التردد المعياري بتغير نصف قطر لب الليف البصري

$r \times 10^{-6} \text{ (m)}$	$V$
1.5	1.909
9.875	12.566
18.250	23.224

26.625	33.882
35	44.539

ويبين الشكل (3-7) تغير قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ ) نتيجة لتغير قدرة الضخ لكل من الليف البصري احادي النمط و متعدد الأنماط، إذ نلاحظ من الشكل أن ( $P_{out}$ ) في حالة أن الليف البصري أحادي النمط قيم أكبر مما هي عليه في حالة الليف البصري متعدد الأنماط ، نظراً لأن التوهين في الليف البصري أحادي النمط قليل جداً [13].

$P_{out} \times 10^{-3}$  (W)



### الشكل رقم (3-7) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة تغير نوع الليف البصري

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

وتم تطبيق المعادلة (2-59) على ثلاث حالات مستعملة عملياً في ليزرات الألياف البصرية تختلف من ناحية قدرة الضخ ، ونصف قطر لب الليف البصري، وطول الليف البصري (طول م وجة الضخ ثابت في الحالات الثلاث  $\lambda_p = 0.790 \times 10^{-6}$  m) وهي كالآتي: -

#### الحالة الأولى

### (3-6)

يبين الجدول (3-12) قيم المعاملات التي اعتمدت في حساب قدرة الخرج الليزري ( $P_{out}$ )، الخاصة بهذه الحالة فضلاً عن المعاملات التي تم حسابها من أجل حساب ( $P_{out}$ )، اما الشكل (3-8) فيوضح علاقة ( $P_{out}$ ) مع ( $P_p(0)$ ) لهذه الحالة [12].

الجدول رقم (3-12) المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الأولى

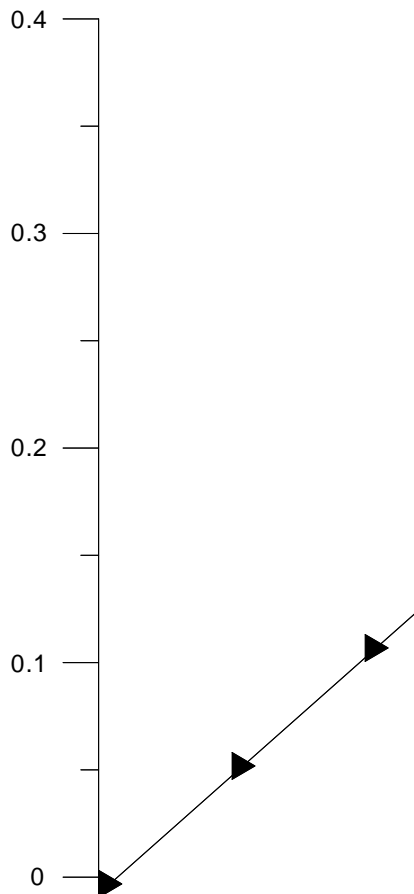
Parameter	Value	Unit
$P_p(0)$	1.400	W

$\lambda_p$	$0.790 \times 10^{-6}$	m
r	$7.800 \times 10^{-6}$	m
L	$50.000 \times 10^{-2}$	m
$R_1$	1.000	-
$R_2$	0.850	-
N	$3.000 \times 10^{26}$	ion/m <sup>3</sup>
$P_{th} (*)$	0.010	W
$\eta_s (*)$	27.532%	-
$G_{th} (*)$	$92.759 \times 10^{-3}$	-
$\alpha_p (*)$	89.999	m <sup>-1</sup>
$A_{eff} (*)$	$1.911 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
V (*)	9.926	-

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

**Pout (W)**



الشكل رقم (3-8) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير قدرة الضخ.

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

### الحالة الثانية

(3-7)

يبين الجدول (3-13) قيم المعاملات التي اعتمدت في حساب ( $P_{out}$ ) الخاصة بهذه الحالة، فضلاً عن المعاملات التي تم حسابها من أجل حساب ( $P_{out}$ )، أما الشكل (3-9) فإنه يوضح تغير ( $P_{out}$ ) مع ( $P_p(0)$ ) لهذه الحالة [28].

الجدول رقم (3-13) المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الثانية

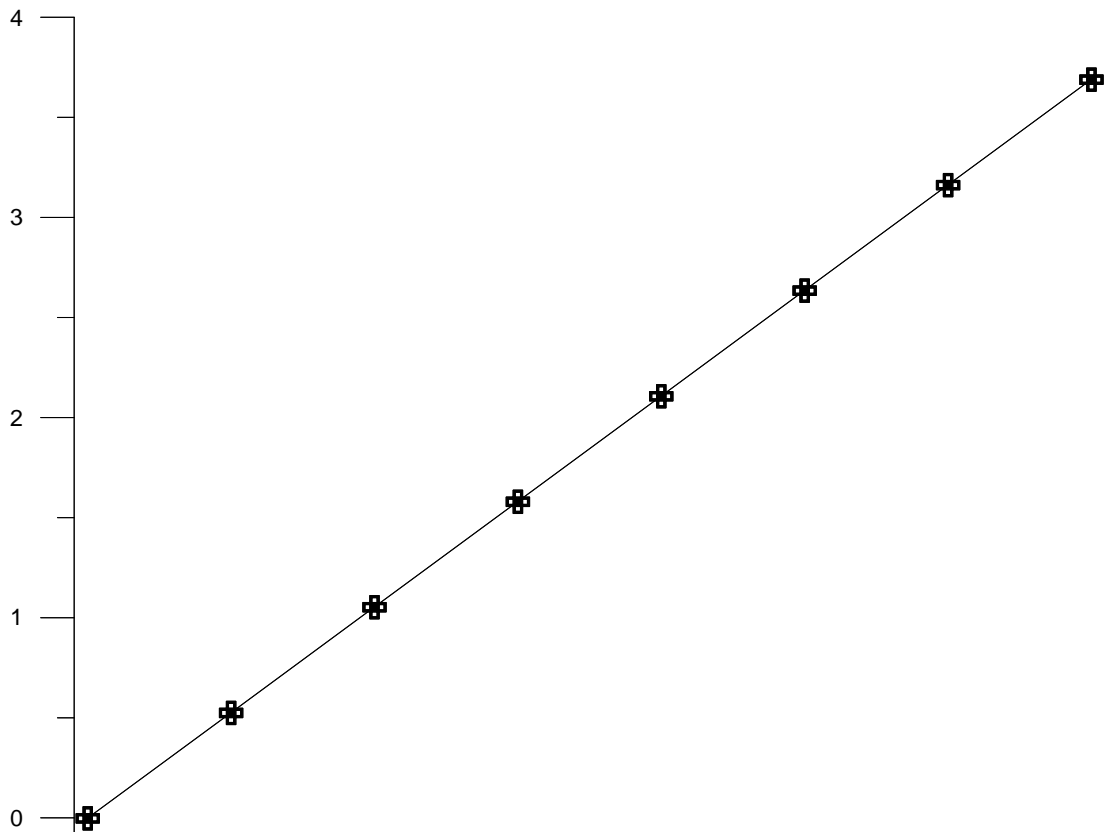
Parameter	Value	Unit
$P_p(0)$	12.000	W
$\lambda_p$	$0.790 \times 10^{-6}$	m
r	$5.000 \times 10^{-6}$	m

L	$7.000 \times 10^{-2}$	m
$R_1$	1.000	-
$R_2$	0.850	-
N	$3.000 \times 10^{26}$	ion/m <sup>3</sup>
$P_{th} (*)$	0.004	W
$\eta_s (*)$	30.818%	-
$G_{th} (*)$	$82.869 \times 10^{-3}$	-
$\alpha_p (*)$	89.869	m <sup>-1</sup>
$A_{eff} (*)$	$0.785 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
V (*)	6.363	-

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

Pout (W)



### الشكل رقم (3-9) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير قدرة الضخ

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

#### الحالة الثالثة

(3-8)

يبين الجدول (3-14) قيم المعاملات التي اعتمدت في حساب ( $P_{out}$ ) الخاصة بهذه الحالة، فضلاً عن المعاملات التي تم حسابها من أجل حساب ( $P_{out}$ )، أما الشكل (3-10) فيوضح تغير ( $P_{out}$ ) مع ( $P_p(0)$ ) لهذه الحالة [51].

الجدول رقم (3-14) المعاملات الأساسية والمعاملات التي تم حسابها للحالة الثالثة.

Parameter	Value	Unit
$P_p(0)$	350.000	W
$\lambda_p$	$0.790 \times 10^{-6}$	m

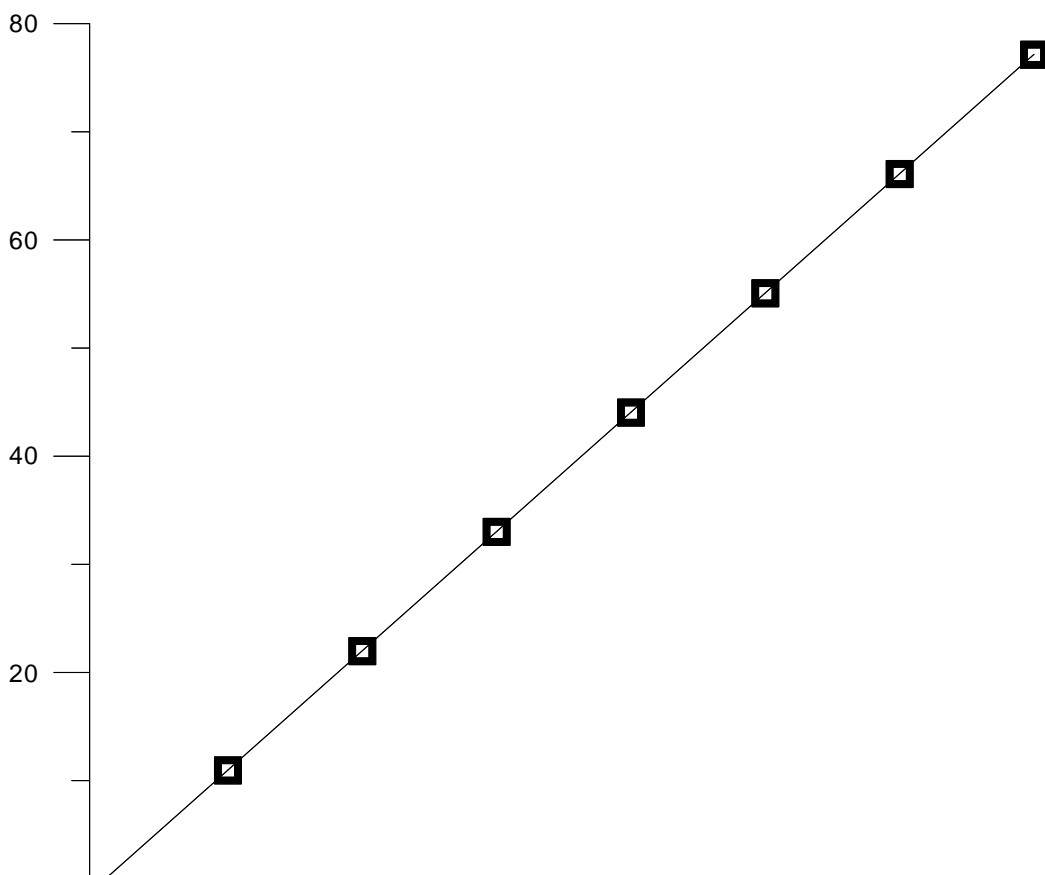


r	$35.000 \times 10^{-6}$	m
L	$150.000 \times 10^{-2}$	m
R <sub>1</sub>	1.000	-
R <sub>2</sub>	0.850	-
N	$3.000 \times 10^{26}$	ion/m <sup>3</sup>
P <sub>th</sub> (*)	0.256	W
η <sub>s</sub> (*)	22.062%	-
G <sub>th</sub> (*)	$115.759 \times 10^{-3}$	-
α <sub>p</sub> (*)	89.999	m <sup>-1</sup>
A <sub>eff</sub> (*)	$38.485 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
V (*)	44.539	-

النتائج والمناقشة

الفصل الثالث

P<sub>out</sub> (W)



الشكل رقم (3-10) تغير قدرة الخرج الليزري نتيجة لتغير قدرة الضخ.

## (4-1) الاستنتاجات (Conclusions)

- 1- تزداد قدرة الخرج الليزري بزيادة تركيز الثوليوم في لب الليف البصري، إذ إن هذه القدرة تثبت تقريباً عند قيمة محددة لهذا التركيز ( $300 \times 10^{24} \text{ ion/m}^3$ )، ومهما أزداد فإن هذه القدرة لا تتأثر بهذه الزيادة.
- 2- تقل قدرة الخرج الليزري بزيادة مساحة مقطع لب الليف البصري، لذلك للحصول على قدرة أعلى لا بد من استعمال ليف بصري بنصف قطر صغير ( $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ ).
- 3- تقل قدرة الخرج الليزري بزيادة طول الليف البصري، وأن هناك قيمة حرجة لطول الليف البصري لا يمكن اعتماد أقل منها ( $5 \times 10^{-2} \text{ m}$ )، وتحدد هذه القيمة تبعاً لقيم، تركيز الثوليوم، ونصف قطر لب الليف البصري، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري، وقدرة الضخ.
- 4- تزداد قدرة الخرج الليزري بزيادة انعكاسية مرآة الخرج الليزري، علماً أن أكبر قيمة لهذه القدرة تم الحصول عليها لهذا الليزر هي عند ( $R_2=0.85$ )، وأن هذه القيمة تتغير تبعاً لطول موجة انبعاث الليزر.
- 5- تزداد قدرة الخرج الليزري بزيادة قدرة الضخ، بافتراض أن جميع المعاملات الأخرى التي تتضمنها معادلة القدرة تكون ثابتة بشرط أن لا تؤدي هذه الزيادة إلى سخونة الليف البصري.
- 6- تكون قدرة الخرج الليزري أكبر عند استعمال ليف بصري أحادي النمط مما لو استعمل ليف متعدد النمط، ويزداد هذا الفرق كلما ازداد التردد المعياري.
- 7- وفقاً لهذه المعالجة النظرية للحصول على ليزر ليف بصري ذي قدرة عالية لا بد من استعمال ليف أحادي النمط ( $r=1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) مطعم بتركيز عالٍ للثوليوم وذي طول قصير ( $5 \times 10^{-2} \text{ m}$ )، وانعكاسية مرآة الخرج الليزري عالية ( $R_2=0.85$ )، وقدرة ضخ عالية نسبياً ( $350 \text{ W}$ ).

## (4-2) المشاريع المستقبلية المقترحة (Suggested futurism projects)

1- تطبيق هذه المعالجة النظرية على ليزرات الليف البصري

$$(\lambda_L=2.7\mu\text{m}, \lambda_p=0.975\mu\text{m}) \text{Er}^{3+}$$

$$(\lambda_L=2.9\mu\text{m}, \lambda_p=1.15\mu\text{m}) \text{Ho}^{3+}$$

$$(\lambda_L=4.6\mu\text{m}, \lambda_p=1.71\mu\text{m}) \text{Dy}^{3+}$$

$$(\lambda_L=8\mu\text{m}, \lambda_p=1.71\mu\text{m}) \text{Tb}^{3+}$$

2- أستعمال معادلات المعدل لاشتقاق معادلة قدرة الخرج الليزري لليزرات الليف البصري التي تعمل وفقاً لخطة الضخ بأربعة مستويات، من أجل تطبيقها على ليزر الليف البصري المطعم بالثوليوم عند الطول الموجي  $(1.47\mu\text{m})$ ، وليزر الليف البصري المطعم بالنيديميوم عند الطول الموجي  $(1.06\mu\text{m})$ .

3- أستعمال معادلات المعدل لاشتقاق معادلة الطاقة وأمد النبضة لليزرات الليف البصري ذات التشغيل النبضي (P).

4- اعتماد معادلة شرودنكر اللاخطية (NLSE) لليزرات الليف البصري لدراسة تأثير كل من التشتت و العوامل اللاخطية في قدرة الخرج الليزري لليزرات الليف البصري.

- [1] G.P.Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems" 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons INC, P (31, 35), (1997).
- [2] G. Keiser, "optical Fiber Communication" 3<sup>rd</sup> edition Mcgraw – Hill International editions Series in Electrical Engineering, P(19, 21), (2000).
- [3] M.Arumugam, "Optical Fiber Communication – An Over view" Pramana – Journal of Physics V (57) N (5 and 6) P (849 -869) (2001).
- [4] S.K.Sarkar, "Optical Fiber and Fiber Optic Communication Systems" 2<sup>nd</sup> edition, S.CHAND and Company LTD, New Delhi, India, P (21, 27) (2001).
- [5] E.Rochat "High – Power Fiber Amplifier for coherent Inter – Satellite Communication" Ph.D Thesis, Universite de Neuchâtel Faculte des Sciences, P (21, 26) (2000).
- [6] M.J.F.Digonnet and C.J. Gaeta," theoretical Analysis of Optical Fiber Laser, Amplifiers and Oscillators" Appl.Opt. V (44), N (3), P (333-341) (1985).
- [7] R.Paschotta," Optical Fiber Technology" SPIE Field Guides Volume FG16, P (1-30), (2010).
- [8] J.K.Kim, "Investigation of High – Nonlinearity Glass Fiber's for Potential Applications in Ultrafast Nonlinear Fiber Devise", Ph.D., Thesis, Virginia Poly technic Institute and State University, P (10-15) (2005).
- [9] S.D.Emami, S.W. Harun, F.Ab.Rahman, H.A.Abdul .Rashid, S.A.Dand, Z.A.Ghaniand and H.Ahmed, A theoretical study of Double – Pass Thulium – Doped Fiber Amplifiers" Optik, V (121), P (1257 -1262) (2010).

- [10] V.Kude and R.Khairnar, "Characterization of Step – Index Signal – Mode Silica Fiber for long Haul Signal Communication" Material Research, V (8), N (3), P (257-259) (2005).
- [11] J.M.Senior "Optical Fiber Communication Principles and Practice" 2<sup>nd</sup> edition, Prentice –Hall of India, New Delhi, P (13-15) (2004).
- [12] Z.E.Würde, "Applied Rare –Earth Spectroscopy for Fiber Laser Optimization" Ph.D. Thesis, der Technisch Universität carolo –Wilhelmina zu Braunschweig, P(78,135)(2001).
- [13] P.J.Suni, D.C.Hanna, R.M.Percival, I.R.Perry, R.G.Smart, J.E.Townsed and A.C.Tropper, "Lasing Characteristics of Ytterbium, thulium and other Rare – Earth Doped Silica based Fibers", SPIE, V (1171), P (234-250) (1989).
- [14] J.L.Doualan, S.Girard, H.Haauin, J.L.Adam and J.Montagne, "Spectroscopic Properties and Laser Emission of Tm –Doped ZBLAN glass at 1.8 $\mu$ m" Optical Materials, V (24), P (563-574) (2003).
- [15] M.S.I.Sarker, "Two Micron Tm –Doped ZBLAN Double –clad Fiber Laser" M.S.Thesis, University of Adelaide, P (25-35), (2011).
- [16] V.Sudesh, T.S.Mccomb, R.A.Sims, L.Shah, M.Richardson, and J.Stryjewski. "Latest Development in High –Power, Tunable, Cw, narrow line Thulium Fiber Laser for development of the ISTEf" ,Proc of SPIE ,V(7325,73250B) ,P(1-8) , (2009).
- [17] X.Zhu, and N.Peyghambarian, " High –Power ZBLAN Glass Fiber Lasers : Review and Prospect" Advances in Opto Electronics, Article, ID501956, P (23), (2010).

- [18] G.P.Agrawal, "Applications of Nonlinear Fiber Optics" 3<sup>rd</sup> Academic Press, P(49), (2001).
- [19] R.S.Quinby and W.J.Miniscaico, "Continuous – Wave Lasing on a self –terminating Transition" Appl.Opt,V(28) ,N(1) ,P(14-16),(1989).
- [20] R.C.Sharp, D.E.Spock, N.Pan, and J.Ellio , "190-fsec Passively Mode –locked Thulium Fiber Laser with a low Threshold". Optics letters ,V(2) ,N(12) ,P(881-883),(1996).
- [21] Brunet, P.Laperle, R.Vallee, S.Larochelle and L.Pujol, "Modeling of Tm – doped ZBLAN blue Upconversion Fiber Lasers Operating at 455nm" Proc, SPIE, P (125 -135) (1999).
- [22] J.Xu, M.Probhu , J.Lu, K.Ueda, and D.Xing , "Efficient double –clad Thulium –Doped Fiber Laser with Ring –Cavity ", Applied Optics ,V(40) ,N(12) ,P(1983-1988)(2001).
- [23] J.Wu, "Thulium Microsphere Laser and Fiber Laser" Ph.D, Thesis, University of Arizona, P (15, 25) (2005).
- [24] J.Geng, J.Wu, and S.Jiang, "Efficient Single-Frequency Thulium –Doped Fiber Laser near 2 $\mu$ m" Optical Society of America, P (1-3) (2007).
- [25] M.A.Solodyakin, E.D.Obratzsova, A.S.Lobach, A.I.Chernov , A.V.Tousenev , V.I.Konov, and E.M.Dianov , "Mode –Locked 1.93 $\mu$ m Thulium –Doped Fiber Laser with a Carbon Nanotube Absorber" Optics Letters, V (33), N (12), P (1336 -1338) (2008).
- [26] B.Richards, X.Isang, D.Binks, J.Loustean, and A.Jha, " Efficient ~2 $\mu$ m Tm<sup>3+</sup>-Doped Tellurite Fiber Laser" Optics Letters, V (33), N (4), P (402 -404) (2008).

[27] Q.Wang, J.Geng, T. Luo, and S.Jiang, "Mode –Locked 2 $\mu$ m with highly Thulium –Doped Silicate Fiber" Optics Letters, V (34), N (23), P (3616 -3621) (2009).

[28] P.F.Moulton, G.A.Rines, E.V.Slobdthchikov, K.F.Wall and L.G. Carter "Tm –Doped Fiber Laser: Fundamentals and Power Scaling" IEEE Journal of Selevted Topics in Quantum Electronic's, V (15), N (1), P (85-92) (2009).

[29] T.S.Mccomb, P.Kadwanj, R.A.Sims, L.Shah, C.C.Willis , G.Frith , V.Sudesh ,B.Samson , and M.Richardson, " Amplification of Picsecond Pulses Generated in Carbon Nanotube Mode – Locked Thulium Fiber Laser" Optical Society of America, P (32816) (2010).

[30] P.Peterka, I.Kasik, A.Dhar, B.Dussardier and W.Blance,"Theoretical Modeling of Fiber Laser at 810 nm based of Thulium –Doped Silica Fibers with enhanced  $^3H_4$  Level Lifetime" Optical Society of America, V (19), N (3), P (2773-27781) (2011).

[31] J.Ding , B.Samson , A.carter , C.Wang , and K.Takala , "Amonolithic Thulium –Doped Single –Mode fiber Laser with 1.5 nm Pulse width and 8Kw Peak Power" 7Airport Park Road, East, CT06026 (2011).

[32] M.Zhang, E.J.R.Kelleher, F.Torrise, Z.Sun,T.Hasan ,D.Papa , F.Wang , A.c.Ferrari , S.V.Popov and J.R.Toylor "Tm –Doped Fiber Laser Mode –Locked by Graphen –Polymer Composite" Optical Society of America (OSA), V (20), N (22), P (25077 - 25084) (2012).

[33] F.Wang, F. Torrise, Z.Jiang, D.Popa, T.Hasan Z.Sun, W.B.Cho, and A.C.Ferrari, "Graphene Passively Q – Switched 2 $\mu$ m Fiber Laser", Optical Socity of America (OSA), JW2A, 72 (2012).



- [34] K. Ramaswamy, C.Jia, M.Dastmalchi, L.R.Chen, and M.Saad, "Dual –Band 810/1480 nm Tm<sup>3+</sup>: ZBLAN Fiber Laser" IEEE, P (273-274) (2013).
- [35] Q.Huang, T.Yu, Y.Zheng, J.Zu, and W.Chen "2.4W Narrow – Line Width Q-Switched Tm<sup>3+</sup> -Doped Double – Clad Fiber Laser" IEEE Photonic Journal, V (5), N (2), P (1500406) (2013).
- [36] P.Wan, L.M.Yang and J.Liu "156 micro –J Ultrafast Thulium –Doped Fiber Laser" SPIE Photonics West, V (1), N (408), P (573) (2013).
- [37] C.W.Rudy, K.E.Urbanek, M.J.F.Digonnet and R.L.Byer, "Amplified 2μm Thulium –Doped All –Fiber Mode –Locked Figure –Eight Laser" Journal Light Wave Technolougy, V (31), N (11), P (1809 -1812) (2013).
- [38] Y.Tang, X.Yu, X.Li, Z.Yan and Q.J.Wang "High –Power Thulium Fiber Laser Q-Switched with Single –Layer Graphene" Optics Letters, V (39), N (3), P (051508 -1) (2014).
- [39] P.Wan, L.M.Yang, and J.Liu, "High – Energy Femtosecond 2μm Fiber Laser", Optical Engineering, V (35), N (5), P (0508 -1) (2014).
- [40] M.Gaponenko, N.Kuleshov, and T.Südmeyer, "Efficient diode –Pumped Tm: Kyw 1.9μm microchip Laser with 1W cw output", Optics Express, 22, issue 10, P (11579-11582) (2014).
- [41] R.S.Quimby "Output Saturation in Fiber Laser" Applied Optics, V (29), N (9), P (1268-1276) (1990).
- [42] R.Paschatta, P.R.Barber, A.C.Tropper, and D.C.Hanna "Characterization and Modeling of Thulium: ZBLAN blue upconversion Fiber Lasers" J.Opt.Soc.Am.B,V(14) ,N(5) ,P(1213-1218) (1997).

- [43] O.Svelto, "Principles of Lasers" Fifth edition, P (255-261) (2010).
- [44] A.W.Köin "fiber Laser Master Oscillators for Optical Synchronization System" Universität Hamburg, P (17-36) (2008)
- [45] A.Sennaroglu," Solid – State Lasers and Applications" University of Roghester, Rochester, New York, P (6-24) (2007).
- [46] S.D.Emami, H.A.Abdul.Rashid, H.Ahmad, and A.Ahmadi "Effect of Transverse Distribution profile of Thulium on the performance of Thulium –Doped Fiber Amplifiers" Ukr.J.Phys.Opt, V (13), N (2), P (74-81) (2012).
- [47] R.S.Coetzee,"Thulium –Doped Fiber Lasers in continuous – wave and Pulsed Regimes" M.S.,Thesis ,Stellenbosch Uinversity ,P(7-30) (2013).
- [48] T.S.Mccomb, R.A.Sims, C.C.C.Willis, P.K.V.Sudesh L.Shah, and M.Richardson, "High –Power widely tunable Thulium Fiber Lasers" Applied Optics, V (49), N (30), P (6236-6242) (2010).
- [49] K.Scholle, S.Lamrini, P.Koopmann, and P.Fuhrberg "2 $\mu$ m Laser Sources and Their Possible Applications" ISBN 978-953-7619-82-4, P (473-500) (2010).
- [50] J.K.Jabczynski, L.Gorajek,W.Zendzian ,J.Kwiatkowski ,H.Jelinkova , J.Sulc, and M.Nemece " Actively Q-Switched Thulium Lasers" ISBN 978-953-7619-80-0, P (95-118) (2010).
- [51] Y.Tang, and J.Xu," High Power tunable Tm<sup>3+</sup>- Fiber Lasers and Application in Pumping Cr<sup>3+</sup>: ZnSe Lasers" ISBN 978-953-7619-82-4, P (403-470) (2010).
- [52] Q.Huany , T.Yu,Y.Zheng , J.Zu, and W.Chen , " 2.4 W Narrow –Line width Q-Switched Tm<sup>3+</sup>-Doped Double –clad Fiber Laser" IEEE Photonics Journal, V (5), N (2), P (1500406) (2013).

## المالحق رقم (1)

$$N_1W_p + N_2W^{i_{23}} - N_3W^{i_{32}} - N_3(X_pW_p + W_3) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

بإعادة ترتيب المعادلة (1) :-

$$N_1W_p - N_3X_pW_p + N_2W^{i_{23}} - N_3W^{i_{32}} - N_3W_3 = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{If } R_p = N_1W_p - N_3W_pX_p$$

المعادلة رقم (2) تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p - (N_3W^{i_{32}} - N_2W^{i_{23}}) = N_3W_3 \quad \dots\dots\dots(3)$$

أو بالصيغة الآتية: -

$$R_p - W^{i_{32}}(N_3 - \frac{W^{i_{23}}}{W^{i_{32}}} N_2) = N_3W_3 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{If } \frac{W^{i_{23}}}{W^{i_{32}}} = X_L, \quad W^{i_{32}} = W^i$$

المعادلة (4) تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p - W^i(N_3 - X_L N_2) = N_3W_3 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{If } \Delta N = N_3 - X_L N_2$$

المعادلة 5 تكون بالصيغة الآتية: -

$$N_3W_3 = R_p - W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(6)$$

أو بالصيغة: -

$$N_3 = R_p \frac{1}{W_3} - W^i \Delta N \frac{1}{W_3} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{If } T_3 = \frac{1}{W_3}$$

$$\therefore [N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3] \quad \dots\dots\dots(8)$$

## المالحق رقم (2)

$$N_3(W_{32}^i + W_{32}) - N_2(W_{23}^i + W_2) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

بإعادة ترتيب المعادلة (1)

$$N_2W_2 = N_3W_{32} + (N_3W_{32}^i - N_2W_{23}^i) = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

أو بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = N_3W_{32} + W_{32}^i(N_3 - \frac{W_{23}^i}{W_{32}^i} N_2) = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{If } \Delta N = N_3 - X_L N_2, \quad W_{32}^i = W^i : \frac{W_{23}^i}{W_{32}^i} = X_L$$

المعادلة 3 تكون بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = N_3W_{32} + W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{If } N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3$$

المعادلة 4 تكون بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = R_p W_{32} T_3 - W^i \Delta N W_{32} T_3 + W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{If } T_3 = \frac{1}{W_3}$$

المعادلة 5 تكون بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = R_p \frac{W_{32}}{W_3} - W^i \Delta N \frac{W_{32}}{W_3} + W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{If } \beta_{32} = \frac{W_{32}}{W_3}$$

المعادلة (6) تكون بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = R_p \beta_{32} - W^i \Delta N \beta_{32} + W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(7)$$

أو بالصيغة الآتية:-

$$N_2W_2 = R_p \beta_{32} + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N \quad \dots\dots\dots(8)$$

المعادلة (8) تكون بالصيغة الآتية:-

$$N_2 = R_p \beta_{32} \frac{1}{W_2} + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N \frac{1}{W_2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{If } T_2 = \frac{1}{W_2}$$

المعادلة (9) تكون بالصيغة الآتية:-

$$[N_2 = R_p \beta_{32} T_2 + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N T_2] \quad \dots\dots\dots(10)$$

### المعادل (3)

$$\Delta N = N_3 - X_L N_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

If  $N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3$

$$N_2 = R_p \beta_{32} T_2 + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N T_2$$

المعادلة (1) تكون بالصيغة الآتية: -

$$\Delta N = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3 - X_L [R_p \beta_{32} T_2 + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N T_2]. (2)$$

If  $T_a = T_3 - \beta_{32} X_L T_2$

$$T_b = T_3 + (1 - \beta_{32}) X_L T_2$$

المعادلة (3) تكون بالصيغة الآتية: -

$$\Delta N = R_p T_a - W^i \Delta N T_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

أو بالصيغة الآتية: -

$$\Delta N (1 + W^i T_b) = R_p T_a \quad \dots\dots\dots (5)$$

لذلك

$$\Delta N = \frac{R_p T_a}{1 + W^i T_b}$$

If  $S = W^i T_b$

$$\left[ \Delta N = \frac{R_p T_a}{1 + S} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

#### المعاشق (4)

$$R_p = N_1 W_p - N_3 X_p W_p \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{If } \Delta N = \frac{R_p T_a}{1+S}, \quad N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3$$

المعادلة (1) تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p = N_1 W_p - X_p T_3 W_3 R_p + X_p W_p \frac{W^i T_3 T_a}{1+S} R_p \dots\dots\dots(2)$$

ويلعادة ترتيب المعادلة (2) تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p [(1 + W_p X_p T_3) - W_p X_p T_3 \frac{W^i T_3}{1+S}] = N_1 W_p \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{If } T_c = X_p T_3$$

المعادلة (3) تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p [(1 + W_p T_c) - W_p T_c \frac{W^i T_a}{1+S}] = N_1 W_p \dots\dots\dots(4)$$

ويلعادة ترتيب المعادلة 4 فلنهما تكون بالصيغة الآتية: -

$$R_p [(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a] = N_1 W_p (1+S) \dots\dots\dots(5)$$

أو بالصيغة الآتية: -

$$[R_p = N_1 \frac{W_p (1+S)}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}] \dots\dots\dots(6)$$

## المالحق رقم (5)

$$N_3 = R_p T_3 - W^i \Delta N T_3 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{If } R_p = N_1 \frac{W_p(1+S)}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

$$\Delta N = \frac{R_p T_a}{1+S} = N_1 \frac{W_p T_a}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

المعادلة (1) تكون بالصيغة الآتية: -

$$N_3 = N_1 \frac{W_p T_3 [1+S - W^i T_a]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{If } S = W^i T_b$$

المعادلة (2) تكون بالصيغة الآتية: -

$$[N_3 = N_1 \frac{W_p T_3 [1+W^i(T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}] \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$N_2 = R_p \beta_{32} T_2 + (1 - \beta_{32}) W^i \Delta N T_2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

المعادلة (4) تكون بالصيغة الآتية: -

$$N_2 = \frac{W_p T_2 [\beta_{32} + W^i T_b \beta_{32} + W^i T_b - W^i T_a \beta_{32}]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} N_1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

وبإعادة ترتيب المعادلة (5) فلنكون بالصيغة الآتية: -

$$[N_2 = N_1 \frac{W_p T_2 [\beta_{32} + W^i T_a + W^i \beta_{32} (T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}] \quad \dots\dots\dots(6)$$

## المعادلة رقم (6)

$$N_{ex} = \sum_{i=2}^3 N_i = N_2 + N_3 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{If } N_3 = N_1 \frac{W_p T_3 [1 + W^i (T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

$$N_2 = N_1 \frac{W_p T_2 [\beta_{32} + W^i T_b \beta_{32} + W^i T_b - W^i T_a \beta_{32}]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

المعادلة (1) تكون بالصيغة الآتية :-

$$N_{ex} = N_1 \frac{W_p [T_3 + W^i T_3 (T_b - T_a) + T_2 \beta_{32} + W^i T_2 T_a + W^i T_2 \beta_{32} (T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} (2)$$

$$\text{If } T_a = T_3 - X_L \beta_{32} T_2$$

$$T_b = T_3 + X_L T_2 (1 - \beta_{32})$$

$$T_d = T_3 + \beta_{32} T_2$$

$$T_e^2 = (1 + X_L) T_2 T_3$$

$$\begin{aligned} & W_p [T_3 + W^i T_3 (T_b - T_a) + T_2 \beta_{32} + W^i T_2 T_a + W^i T_2 \beta_{32} (T_b - T_a)] \text{ فلن} \\ & = W_p (T_d + W^i T_e^2) \end{aligned}$$

لذلك تكون المعادلة بالصيغة الآتية :-

$$[N_{ex} = N_1 \frac{W_p [T_d + W^i T_e^2]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}] \dots \dots \dots (3)$$



## المعاشق (7)

$$N = N_1 + N_{ex} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{If } N_{ex} = N_1 \frac{W_p [T_d + W^i T_e^2]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

المعادلة (1) تكون بالصيغة الآتية: -

$$N = N_1 \frac{(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a + W_p [T_d + W^i T_e^2]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{If } T_f^2 = X_L T_c T_2$$

$$\begin{aligned} & (1 + S)(1 + W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a + W_p [T_d + W^i T_e^2] \text{ فلن} \\ & = (1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)] \end{aligned}$$

المعادلة 2 تكون بالصيغة الآتية: -

$$N = N_1 \frac{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \dots\dots\dots(3)$$

أو بالصيغة الآتية: -

$$N_1 = N \frac{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \dots\dots\dots(4)$$

المعادلة (8)

$$dI_p = - I_p(N_1 - X_p N_3) \sigma_p dz \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{If } N_3 = N_1 \frac{W_p T_3 [1 + W^i(T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

$$N_1 - X_p N_3 = N_1 \frac{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a] - X_p W_p T_3 [1 + W^i(T_b - T_a)]}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \dots\dots\dots(2)$$

$$[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a] - X_p W_p T_3 [1 + W^i(T_b - T_a)] \text{ أن} \\ = (1+S)$$

لذلك المعادلة (2) تكون بالصيغة الآتية: -

$$N_1 - X_p N_3 = N_1 \frac{(1+S)}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{If } N_1 = N \frac{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i(T_e^2 + T_f^2)]}$$

المعادلة (3) تكون بالصيغة الآتية: -

$$N_1 - X_p N_3 = N \frac{(1+S)}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) - W_p T_c W^i T_a]} \dots\dots\dots(4)$$

أو بالصيغة الآتية: -

$$[N_1 - X_p N_3 = \frac{N}{1 + \frac{W_p [(T_c + T_d) + W^i(T_e^2 + T_f^2)]}{(1+S)}}] \dots\dots\dots(5)$$

المالحق رقم (9)

$$G = \int_0^L \Delta N(z) \sigma_L dz \dots\dots\dots (1)$$

If  $\Delta N = \frac{R_p T_a}{1+S}$

$$R_p = N_1 \frac{W_p(1+S)}{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}$$

$$N_1 = N \frac{[(1+S)(1+W_p T_c) - W_p T_c W^i T_a]}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]}$$

$$\therefore \Delta N = W_p T_a \frac{N}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \dots\dots\dots (2)$$

ولكن

$$dI_p = -I_p(1+S) \frac{N}{(1+S) + W_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]} \sigma_p dz \dots\dots\dots (3)$$

بمقارنة المعادلة (3) مع (2) ينتج :-

$$dI_p = -I_p \frac{(1+S)\Delta N}{W_p T_a} \sigma_p dz \dots\dots\dots (4)$$

أو بالصيغة الآتية :-

$$\Delta N = - \frac{W_p T_a}{(1+S)\sigma_p I_p} \frac{dI_p}{dz} \dots\dots\dots (5)$$

if  $W_p = \frac{I_p \sigma_p}{h\nu_p}$

المعادلة (5) تكون بالصيغة الآتية :-

$$[\Delta N = - \frac{T_a}{(1+S)h\nu_p} \frac{dI_p}{dz}] \dots\dots\dots (6)$$

المعادلة رقم (10)

$$G = \frac{T_a \sigma_1}{(1+s)h\nu_p} (I_{p0} - I_p) \dots \dots \dots (1)$$

وبإعادة ترتيب المعادلة (1) بالصيغة الآتية: -

$$I_p - I_{p0} = - \frac{Gh\nu_p(1+S)}{T_a \sigma_1} \dots \dots \dots (2)$$

$$\ln \frac{I_p}{I_{p0}} + \frac{\sigma_p [(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)]}{h\nu_p(1+S)} (I_p - I_{p0}) = -\alpha_p L \dots \dots (3)$$

بتعويض المعادلة 2 في 3 فإن المعادلة 3 تكون بالصيغة الآتية: -

$$\ln \frac{I_p}{I_{p0}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_L} G \frac{(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)}{T_a} = -\alpha_p L \dots \dots \dots (4)$$

ولكن المقدار

$$\frac{(T_c + T_d) + W^i (T_e^2 + T_f^2)}{T_a} = \frac{T_c + T_d}{T_a} \left[ 1 + W^i T_b \frac{(T_e^2 + T_f^2)}{T_b (T_c + T_d)} \right]$$

$$\text{If } a_1 = \frac{T_c + T_d}{T_a}$$

$$S = W^i T_b$$

$$a_2 = \frac{T_e^2 + T_f^2}{T_b (T_c + T_d)}$$

المعادلة 4 تكون بالصيغة الآتية: -

$$\ln \frac{I_p}{I_{p0}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_L} G a_1 (1 + a_2 S) = -\alpha_p L \dots \dots \dots (5)$$

او بالصيغة الآتية: -

$$\left[ \ln \frac{I_p}{I_{p0}} = -\alpha_p L + \frac{\sigma_p}{\sigma_L} G a_1 (1 + a_2 S) \right] \dots \dots \dots (6)$$

## المحقة رقم (11)

**Input** ( $\lambda_p, \sigma_p, X_p, \lambda_L, \sigma_L, X_L, \alpha_L, T_2, T_3, \beta_{32}, W^i, r, N_A, N_0, h, L, C, P_{p1}, R_1, R_2$ )

Calculate ( $P_{th}$ ) from equation (2-54)

Calculate ( $\eta_s$ ) from equation (2-55)

Calculate ( $P_{abs}$ ) from equation (2-58)

Calculate ( $P_{out}$ ) from equation (2-59)

## Abstract

This study is a theoretical treatment to derive the equation of laser output power using the rate equations for a continuous – wave laser system operation by quasi – three –level system for pumping and lasing, Where the pumping up directly to the upper laser level, and excited state absorption (ESA) is neglected.

The equation of laser output power, which is derived according to this a theoretical treatment had been applied on  $Tm^{3+}$ - doped ZBLAN fiber laser at lasing ( $2.32 \times 10^{-6}m$ ) and pumping ( $0.790 \times 10^{-6}m$ ), as an example of a typical optical fiber laser operating by above pumping system , by using the software program (MATLAB , 8.1) to simulate the effect of the parameters included in the equation of laser output power of this type of laser.

The results of this simulation showed that , the laser output power increases with increase of a concentration of  $Tm^{3+}$  and it is stable with a specific value ( $N=3 \times 10^{26} \text{ ion}/m^3$ ) , it also increase of each of reflectivity of the output laser mirror ( $R_2=0.85$ ) and pumping power ( $P_p(0)=350W$ ), as well as ( $r= 1.5 \times 10^{-6}m$ ) , found that it was this laser output power is the increase of each the radius core and length of optical fiber assuming that the other parameters would be fixed.

Republic of Iraq  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
University of Baghdad  
Ibn Al-Haitham-Pure Science College of Education



# **Theoretical Study of the Output Power in Thulium-Doped Optical Fiber Laser**

A thesis

Submitted to the College of Education Pure Science -Ibn  
Al-Haitham-University of Baghdad as Partial fulfillment  
of the requirements for the Degree masters of Science in  
Physic

Presented by

**Aseel Salih Taha**

(Bachelor of Science in Physics 2006)

Supervis by

Prof.Dr.Samir Ata Maki

Dr.Mudhir Shihab Ahmed