



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم: الفيزياء



رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة
تخصص: فيزياء إشعاع

من إعداد:

السيدة رقية التجاني – الزهرة رزاق زوازي

الموضوع:

تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي بـ Nd:YAG
باستعمال التطعيم المضاعف بواسطة Cérium :

نوقشت يوم: 2023/06/07

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيساً
مناقشاً
مؤطراً

أستاذ التعليم العالي
أستاذ التعليم العالي
أستاذ مُحاضر (أ)

محبوب محمد الصادق
رحومة فرحات
محلّو السعيد

الموسم الجامعي: 2022 / 2023

أنجزت المذكرة بمخبر استغلال وتنمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES)

الإهداء

الحمد لله والشكر لله على كلّ خيرٍ آتاني إياه، وصلى الله وسلّم وبارك على عبده ورسوله
نبيّنا محمّد وعلى آله وأصحابه أجمعين.

أهدي هذا العمل المتواضع إلى:

والديّ الكريمين،

زوجي وابنتي،

إخوتي و أخواتي و كلّ أفراد العائلة الكبيرة،

كلّ أساتذتي و معلميّ،

كلّ أصدقائي و زملائي،

إلى متعة السّعي نحو المعرفة وشغف الاكتشاف والأمل في استخدامهما من أجل ازدهار البشريّة.

السّيدة رقيةّ التّجانيّ

الإهداء

الحمد لله والشكر لله على إتمام هذا العمل والصلاة والسلام على رسول الله.
أتشرف بإهداء ثمرة هذا العمل إلى القلب الكبير الذي سخر عمره من أجل وصولي
لهاته المرحلة والدي الغالي، وإلى نبض القلب ونبع الحنان والتفاؤل والأمل أمي الغالية،
إلى من تقاسمت معهم حلو الحياة ومُرّها وأعتزّ بكونهم أخواتي وإخوتي وأبنائهم،
وإلى كلّ من ساندني من بعيد أو قريب بكلمة طيبة تشرح القلب وقت الضيق،
وكلّ التقدير والاحترام للأستاذ المشرف محلّ السعيد.
وإلى كلّ من نسيتهم بقلمتي ولكن لن أنساهم بقلبي ...

الزّهرة رزاق زوازي

تشكر و عرفان

بسم الله الرحمن الرحيم، والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيّدنا محمد صلّى الله عليه وسلّم وعلى آله وصحبه أجمعين.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصّالحات، والحمد لله الذي أعاننا على إتمام هذا العمل و وفّقنا فيما سعيّنا إليه.

بدايةً، نتقدم بجزيل الشكر و العرفان إلى الأستاذ المشرف الفاضل **محلّو السعيد** لإشرافه على هذه المذكرة، والذي كان عوناً كبيراً لنا من خلال توجيهاته و إرشاداته.

كما نتوجّه بخالص الشكر إلى **كلّ أعضاء لجنة المناقشة** (الأساتذة الموقّرون: **محبوب محمّد الصادق – رحومة فرحات – محلّو السعيد**) لقبولهم مراجعة و تقييم هذا العمل المتواضع.

شكر خاصّ إلى جميع من كانوا لنا عوناً، أعضاء مخبر استغلال و تجميع المصادر الطاقوية الصّحراوية (LEVRES) خاصّة رئيس المخبر الأستاذ **فرحات رحومة**.

الشكر موصول كذلك إلى **كلّ أساتذة قسم الفيزياء** بكلّية العلوم الدّقيقة.

فهرس المحتويات

I	الاهداءات
III	تشكر وعرفان
IV	فهرس المحتويات
VII	قائمة الاشكال
IX	قائمة الجداول
X	قائمة الرموز
XI	قائمة المصطلحات
01	المقدمة العامة

الفصل الأول: الليزر و الليزر الشمسي

03	1.I مقدمة
03	2.I تعريف الليزر
03	3.I مميزات شعاع الليزر
03	1.3.I أحاديّة الطول الموجي
04	2.3.I الاتجاهيّة
04	3.3.I الترابط
04	4.3.I السطوع
05	4.I مكونات المنظومة الليزرية
05	1.4.I الوسط الفعّال
05	2.4.I الضخّ (التحفيز)
05	3.4.I المرنان
06	5.I آليات تفاعل الإشعاع - المادة
08	6.I شروط الانبعاث الليزري
09	7.I أنواع الأنظمة الليزرية
09	1.7.I منظومة ثلاثيّة المستوى
09	2.7.I منظومة رباعيّة المستوى
10	8.I الليزر الشمسي
10	1.8.I تمهيد
10	2.8.I مكونات تقنية الليزر الشمسي
11	1.2.8.I منظومة التركيز الأوليّة (Primary stage concentrator)
11	2.2.8.I منظومة التتبع الشمسية (Solar tracking system)
11	3.2.8.I منظومة التركيز الثانية (Second-stage concentrator)
11	4.2.8.I الوسط الليزري (المادة الفعّالة)

12	 5.2.8.I منظومة التبريد (Cooling system)
12	 6.2.8.I مرنانة الليزر أو التجويف الليزري
13	 3.8.I طرق ضخ الليزر الشمسي
13	 1.3.8.I الضخ غير المباشر
13	 2.3.8.I الضخ المباشر
13	 3.3.8.I آليات الضخ المباشر لليزر الشمسي
13	 (أ) الضخ الطرفي - الجانبي
14	 (ب) الضخ الجانبي
14	 4.8.I تطبيقات الليزر الشمسي
14	 9.I خاتمة

الفصل الثاني: الإشعاع الشمسي و ليزرات الحالة الصلبة

15	 1.II مقدّمة
15	 2.II الشمس
16	 3.II الإشعاع الشمسي
16	 4.II طيف الإشعاع الشمسي
17	 5.II ليزرات الحالة الصلبة المعروفة
17	 1.5.II أيونات الأتربة النادرة
18	 2.5.II التوزيع الالكتروني لذرات الأتربة النادرة وأيوناتها
19	 3.5.II اختيار المواد المضيفة مع أيونات الأتربة النادرة
20	 4.5.II ليزرات النيوديميوم (Neodymium Lasers)
20	 1.4.5.II المادّة المضيفة عقيق الإيتريوم والألمنيوم (YAG)
21	 2.4.5.II النيوديميوم (Nd)
21	 3.4.5.II عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعّم بالنيوديميوم (Nd:YAG)
22	 4.4.5.II ليزر Nd:YAG
25	 5.4.5.II إنشاء ليزر Nd:YAG
26	 5.5.II التطعيم المضاعف لـ YAG بـ Nd^{+3} و Cr^{+3} أو Ce^{+3}
26	 6.5.II عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم والسيريوم (Ce:Nd:YAG)
27	 7.5.II الأطياف الضوئية ونقل الطاقة من أيونات Ce^{3+} إلى Nd^{3+} في وسط Ce:Nd:YAG
29	 6.II خاتمة

الفصل الثالث: المحاكاة العددية و مناقشة النتائج

30	 1.III مقدّمة
30	 2.III المحاكاة العددية
30	 1.2.III برنامج Zemax® لتصميم منظومة الليزر الشمسي
31	 2.2.III المصادر (Sources)

31	 (geometric optical elements) العناصر البصريّة الهندسيّة 3.2.III
31	 (detectors) الكواشف 4.2.III
32	 تحليل طاقة الضخ الممتصّة 5.2.III
33	 برنامج LASCAD TM لمحاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي 6.2.III
33	 تحليل العناصر المتناهية (FEA) للتأثيرات الحراريّة 7.2.III
35	 طريقة انتشار شعاع الليزر (BPM) 8.2.III
35	 منظومة الليزر الشمسي 3.III
36	 منظومة التّركيز الأوليّة (المُرْكُز ذو القطع المكافئ) 1.3.III
37	 الدّليل الموجي 2.3.III
37	 التّجويف البصري 3.3.III
38	 وسط الليزر (الوسط الفعّال) 4.3.III
38	 التّجويف الرّنيني 5.3.III
38	 حوض التّبريد 6.3.III
39	 نتائج المحاكاة العدديّة باستعمال برنامج Zemax [®] لـ Nd:YAG 4.III
39	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة عند بؤرة التّركيز (الكاشف الأوّل) 1.4.III
40	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة عند مخرج الدّليل الموجي (الكاشف الثّاني) 2.4.III
41	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة حول الوسط الفعّال (الكاشف الثّالث) 3.4.III
42	 نتائج المحاكاة العدديّة باستعمال برنامج Zemax [®] لـ Ce:Nd:YAG 5.III
42	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة عند البؤرة (الكاشف الأوّل) 1.5.III
43	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة عند مخرج الدّليل الموجي (الكاشف الثّاني) 2.5.III
44	 قياس الاستطاعة الضّوئيّة حول الوسط الفعّال (الكاشف الثّالث) 3.5.III
45	 نتائج المحاكاة العدديّة باستعمال برنامج LASCAD TM 6.III
45	 بالنسبة لـ Nd:YAG 1.6.III
46	 بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG 2.6.III
46	 مناقشة النّتائج 7.III
47	 خاتمة 8.III
48	 الخاتمة العامّة
49	 المراجع

قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	ترتيب الشكل
الفصل الأول		
3	طيف ليزر الهيليوم-نيون.	(1.I)
4	صورة توضح تشتت الضوء العادي واتجاهية ضوء الليزر.	(2.I)
4	صورة توضح فرق الترابط بين ضوء الليزر والضوء العادي.	(3.I)
5	منظومة الليزر.	(4.I)
6	آلية حدوث الامتصاص.	(5.I)
7	آلية حدوث الانبعاث التلقائي.	(6.I)
7	آلية حدوث الانبعاث المحفز.	(7.I)
8	التعداد السكاني المعكوس.	(8.I)
9	نظام ذو ثلاث مستويات طاقوية.	(9.I)
10	نظام ذو أربعة مستويات طاقوية.	(10.I)
12	رسم تخطيطي لمرنان الليزر.	(11.I)
13	رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطرقي - الجانبي لليزر الشمس.	(12.I)
14	رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزر الشمسي.	(13.I)
الفصل الثاني		
16	توزيع طيف الإشعاع الشمسي.	(1.II)
17	محاكاة إشعاع الجسم الأسود لطيف الإشعاع الشمسي.	(2.II)
18	موضع أيونات الأتربة النادرة في الجدول الدوري.	(3.II)
20	صورة لبلورة عقيق الإيتريوم والألمنيوم (YAG, Y ₃ Al ₅ O ₁₂).	(4.II)
21	مستويات الطاقة و الانتقالات الإلكترونية للنيوديميوم.	(5.II)
23	مخطط مستوى الطاقة لمادة ليزر Nd:YAG.	(6.II)
24	طيف الامتصاص و الإصدار (الانبعاث) لـ Nd:YAG.	(7.II)
24	طيف الإشعاع الشمسي مع طيف امتصاص Nd:YAG.	(8.II)
25	هيكل منظومة الليزر الشمسي Nd:YAG.	(9.II)
28	(أ) طيف الانبعاث الشمسي بمدى طول موجي 300-900nm؛ الأشعة فوق البنفسجية (UV)؛ الضوء المرئي (VIS)؛ بالقرب من الأشعة تحت الحمراء (NIR)؛ (ب) طيف امتصاص Ce:Nd:YAG و طيف الفلورة Ce:YAG؛ (ج) طيف الامتصاص Nd:YAG.	(10.II)
29	رسم تخطيطي لمستوى الطاقة يوضح آليات نقل الطاقة بين أيونات Nd ³⁺ و Ce ³⁺ في الوسط الفعال Ce:Nd:YAG. (1) مسار نقل الطاقة الإشعاعي. (2) مسار التحول التنازلي للقطع الكمي.	(11.II)

الفصل الثالث

- 31 (1.III) صورة توضح واجهة برنامج Zemax®.
- 32 (2.III) تصميم الوسط الفعال و الكاشف الحجمي في برنامج Zemax®.
- 33 (3.III) صورة توضح واجهة برنامج LASCAD™.
- 34 (4.III) (أ) نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامج LASCAD™. (ب) تحديد مصدر النص العددي الذي يمثل الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال من خلال ملف بيانات Zemax®.
- 34 (5.III) (أ) متغيرات تحديد درجة حرارة الغرفة. (ب) متغيرات مادة الوسط الفعال (Nd:YAG).
- 35 (6.III) (أ) ملف شعاع المرآة الناتج. (ب) نصف قطر شعاع الليزر BPM على تكرار التجويف.
- 36 (7.III) رسم تخطيطي يوضح منظومة الليزر الشمسي المقترحة.
- 36 (8.III) رسم تخطيطي يوضح تركيز الأشعة بواسطة المركز ذو القطع المكافئ.
- 37 (9.III) رسم تخطيطي يوضح أبعاد الدليل الموجي.
- 37 (10.III) رسم تخطيطي يوضح التجويف البصري.
- 38 (11.III) رسم تخطيطي يوضح أبعاد القضيب لمادة ليزر Ce:Nd:YAG
- 38 (12.III) رسم تخطيطي يوضح التجويف الرنيني.
- 39 (13.III) رسم تخطيطي يوضح حوض التبريد.
- 40 (14.III) صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة الشمسية عند بؤرة المُركِّز.
- 40 (15.III) صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة عند مخرج الدليل الموجي.
- 41 (16.III) صورة توضح توزيع الاستطاعة الممتصة من طرف القضيب (الوسط الفعال (Nd:YAG).
- 41 (17.III) صورة توضح نتيجة الاستطاعة الممتصة لـ Nd:YAG باستخدام برنامج Excel®.
- 42 (18.III) صورة توضح خطوات ادراج مادة جديدة في برنامج Zemax®.
- 43 (19.III) صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة الشمسية عند بؤرة المُركِّز.
- 43 (20.III) صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة عند مخرج الدليل الموجي.
- 44 (21.III) صورة توضح توزيع الاستطاعة الممتصة من طرف القضيب (الوسط الفعال (Ce:Nd:YAG).
- 44 (22.III) صورة توضح نتيجة الاستطاعة الممتصة لـ Ce:Nd:YAG باستخدام برنامج Excel®.
- 45 (23.III) (أ) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الامتصاص للضخ لـ (Nd:YAG) باستخدام برنامج LASCAD™. (ب) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة انعكاسية المرآة.
- 46 (24.III) (أ) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الامتصاص للضخ لـ (Ce:Nd:YAG) باستخدام برنامج LASCAD™. (ب) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة انعكاسية المرآة.

قائمة الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	ترتيب الجدول
الفصل الثاني		
19	التوزيع الإلكتروني لذرات الأتربة النادرة وأيوناتها والمستوى الأساسي الموافق.	(1.II)
19	نطاقات الامتصاص والإصدار لبعض أيونات الأتربة النادرة.	(2.II)
22	الخصائص الحرارية لـ Nd:YAG.	(3.II)
22	أهم الخصائص البصرية و الفيزيائية لـ Nd:YAG.	(4.II)
27	أهم الخصائص الكيميائية، الفيزيائية و الليزرية لـ Ce:Nd:YAG.	(5.II)

قائمة الرموز

الوحدة	الرمز	المقادير الفيزيائية
[Hz]	ν	تردد الفوتونات
[eV]	E	طاقة الإلكترون في مستوى معين
atom/m ³	N_1	عدد الذرات في المستوى الأدنى
atom/m ³	N_2	عدد الذرات في المستوى الأعلى
[m ³ ·s ⁻² ·J ⁻¹]	B_{12}	معامل أينشتاين للامتصاص المحفّز
[J·s·m ⁻³]	$\rho(\nu)$	كثافة طاقة الإشعاع الوارد
[s ⁻¹]	W_{12}	احتمال الإثارة (الامتصاص) لوحدة الزمن
[J·s]	h	ثابت بلانك
[J/K]	k	ثابت بولتزمان
[K]	T	درجة الحرارة
[s ⁻¹]	A_{21}	معامل أينشتاين للانبعاث التلقائي
[s]	τ_{rad}	زمن مكوث أو عمر الطبقة
[m ³ ·s ⁻² ·J ⁻¹]	B_{21}	معامل أينشتاين للانبعاث المحفّز
[s ⁻¹]	W_{21}	احتمال الانبعاث المحفّز لوحدة الزمن
[W/m ²]	Φ	التدفق الطاقوي
[m]	λ	طول الموجة
/	n	قرينة انكسار الوسط الفعّال
[m/s]	c	سرعة الضوء في الفراغ
[m]	R_S	نصف قطر الشمس
[K]	T_S	درجة حرارة الشمس
[J·s ⁻¹ ·m ⁻² ·K ⁻⁴]	σ	ثابت ستيفان-بولتزمان
%	R	معامل انعكاسية المرآة
/	$\tan \alpha$	كفاءة الميل (الانحدار) لتحويل الاستطاعة الشمسية (استطاعة الضخ) الممتصة من طرف الوسط الفعّال إلى ليزر شمسي

قائمة المصطلحات

العربية	الإنجليزية
مصفوفة ABCD	ABCD matrix
الاستطاعة الممتصة	Absorbed power
تحليل طاقة الضخ الممتصة	Absorbed pumping energy analysis
امتصاص	Absorption
طيف امتصاص	Absorption spectrum
الوسط الفعال	Active medium
تطبيقات	Applications
طريقة انتشار شعاع الليزر (BPM)	Beam Propagation Method (BPM)
الجسم الأسود	Black body
السطوع	Brightness
CaF_2	Calcium fluoride
CaMoO_4	Calcium molybdate
CaWO_4	Calcium tungstate
عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم و السيريوم	Cerium-doped neodymium yttrium aluminum garnet (Ce:Nd:YAG or Ce,Nd:YAG)
أيونات السيريوم	Cerium ions
الضخ الكيميائي	Chemical pumping
أيونات الكروم	Chromium ions
عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم و الكروم	Chromium-doped neodymium yttrium aluminum garnet (Cr:Nd:YAG)
الترابط	Coherence
حزمة التوصيل	Conduction band
نظام الموجة المستمرة	Continuous wave system
تحويل ضوء الشمس إلى ليزر	Conversion of solar light to laser
عملية التبريد	Cooling process
التحويل التنازلي التعاوني	Cooperative down-conversion
الأشعة الكونية	Cosmic rays
تكلفة	Cost
الزاوية الحرجة	Critical Angle
الشبكة البلورية	Crystal lattice
البلورات	Crystals

Detectors	الكواشف
Dialogues	الحوارات
Direct pumping	الضخ المباشر
Direct solar concentration	التركيز المباشر لأشعة الشمس
Direct sunlight	الضوء الشمسي المباشر
Directionality	الاتجاهية
Dispersion	التشتت
Double doping / Co-doping	التطعيم المضاعف
Down-conversion	التحويل التنازلي
Durability	الصمود
Editor windows	نوافذ المحرر
Einstein coefficients ratio	نسبة معاملات أينشتاين
Electrical pumping	الضخ الكهربائي
Electromagnetic spectrum	الطيف الكهرومغناطيسي
Electronic Distribution	توزيع الكتروني
Electrons	الإلكترونات
Emission spectrum	طيف الإصدار
End-pumping	الضخ الطرفي
Energy flux	تدفق الطاقة
Energy level	مستوى الطاقة
Energy transfer mechanisms	آليات نقل الطاقة
Enhancing laser system efficiency	تحسين كفاءة منظومة الليزر
Excellent beam quality	جودة الشعاع الممتازة
Excited level	المستوي المثار
Fast Fourier Transform (FFT)	تحويل فورييه السريع (FFT)
Feedback	التغذية العكسية
Fluorescence lifetime	مدى حياة الفلورة / الفلورية
Fluorescence lines	خطوط الفلورة / الفلورية
Four-level system	منظومة رباعية المستوى
Gamma rays	الأشعة غاما
Gas	المادة الغازية
Gaussian-shaped beam	حزمة ذات شكل غاوسي
Geometric optical elements	العناصر البصرية الهندسية
Glass	الزجاج
Ground level	المستوى الأساسي/الأرضي

Heat Dissipation Efficiency	كفاءة تبديد الحرارة
High efficiency	الكفاءة العالية
High Thermal and Mechanical Properties	خصائص حرارية وميكانيكية عالية
High Thermal Conductivity	موصلية حرارية عالية
Host Material	المادة المضيفة
Improved active medium Ce:Nd:YAG	الوسط الفعال المحسن Ce:Nd:YAG
Incident radiation energy density	كثافة طاقة الإشعاع الوارد
Indirect pumping	الضخ غير المباشر
Infrared radiation	الأشعة تحت الحمراء
Interference	التداخل
Krypton lamps	مصابيح الكريبتون
Lanthanum fluoride	LaF ₃
LASER	الليزر
Laser cavity	تجويف الليزر
Laser medium	وسط الليزر
Laser system	المنظومة الليزرية
Laser system structure	هيكل منظومة الليزر
Laser transition levels	مستوى حدي للانتقالات الليزرية
Laser transitions	الانتقالات الليزرية
Lifetime	زمن مكوث
Light amplification	تضخيم الضوء
Light scattering	تشتت الضوء
Liquid	المادة السائلة
Long Excitation Lifetime	عمر إثارة طويل
Longitudinal	الطولي
Losses	الفقدان / الضياعات
Losses inside the waveguide	الضياعات داخل الدليل الموجي
Low Heat Sensitivity	حساسية منخفضة للحرارة
Low Pumping Threshold	عتبة ضخ منخفضة
Main windows	النوافذ الرئيسية
Metastable level	المستوي شبه المستقر
Microwaves	أشعة الميكروويف
Mode	النمط
Neodymium ion	أيون النيوديميوم

Neodymium Lasers	ليزرات النيوديميوم
Neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd:YAG)	عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم
Non-laser transition heat	الحرارة الناتجة عن الانتقالات غير الليزرية
Non-radiative relaxation	الاسترخاء غير الإشعاعي
Non-sequential rays	الأشعة غير المتسلسلة
Nuclear energy	الطاقة النووية
Number of atoms	عدد الذرات
Numerical modeling and simulation	نمذجة ومحاكاة عددية
Optical elements	عناصر بصرية
Optical fibers	الياف بصرية
Optical power	الاستطاعة الضوئية
Optical pumping	الضخ الضوئي
Optical system design	تصميم الأنظمة البصرية
Pixel	البيكسل (نقطة سطحية)
Photon	الفوتون
Photonic oscillation	التذبذب الفوتوني
Population inversion	الانقلاب السكاني
Primary stage concentrator	المنظومة التركيز الأولية
Pulsed system	النظام النبضي
Pump density	كثافة ضخ
Pump radiation	إشعاع الضخ
Pump threshold	عتبة ضخ
Pumping	الضخ
Quantum cutting	القطع الكمي
Quantum cutting down-conversion pathway	مسار التحويل التنازلي للقطع الكمي
Radiative energy transfer	نقل الطاقة الإشعاعية
Radiative energy transfer pathway	مسار نقل الطاقة الإشعاعي
Radio waves	أشعة الراديو
Rare Earth Ions	أيونات الأتربة النادرة
Rectangle detector	الكاشف المستطيل
Reflecting mirrors (rear mirror, front mirror)	المرآتان العاكستان (المرآة الخلفية، المرآة الأمامية)
Refractive Index	معامل الانكسار
Renewable energy cycles	دورات الطاقة المتجددة

Resistant to breakage	مقاومة للكسر
Resonator	المرنان
Ruby	الياقوت الاصطناعي
Rod	القضيب
Sapphire	الياقوت
Secondary stage concentrator	المنظومة التركيز الثانية
Semiconductor laser	ليزر اشباه الموصلات
Sequential ray tracing	تتبع الشعاع المتسلسل
Side-pumping	الضخ الجانبي
Silica	السيليكا
Single wavelength	أحادية الطول الموجي
Slope efficiency	كفاءة الميل (الانحدار)
Solar cells	الخلايا الشمسية
Solar concentrator area	مساحة المركز الشمسي
Solar energy	الطاقة الشمسية
Solar laser	الليزر الشمسي
Solar laser technology	تقنية الليزر الشمسي
Solar pumped laser	الليزر الشمسي
Solar radiation	الأشعة الشمسية
Solar spectrum	الطيف الشمسي
Solar tracking system	التتبع الشمسي
Solid-state	المادة الصلبة
Solid-state lasers	ليزرات الحالة الصلبة
Solid-state systems	الأنظمة ذات الحالة الصلبة
Sources	المصادر
Spectrum	الطيف
Spherical lens	العدسة الكروية
Spontaneous emission	الانبعاث التلقائي
Standard Solar Emission Spectrum	طيف الانبعاث الشمسي القياسي
Stefan-Boltzmann constant	ثابت ستيفان-بولتزمان
Stimulated emission	الانبعاث المحفز
Sun	الشمس
Temperature	درجة الحرارة
Thermal conductivity	موصلية حرارية
Thermal distortion	تشوه/حمل حراري

Three-dimensional	ثلاثي الأبعاد
Three-level system	منظومة ثلاثية المستوى
Total internal reflection	مبدأ الانعكاس الكلي
Tracking system	المنظومة التتبع
Traditional optics	البصريات التقليدية
Transverse	المستعرض
Ultraviolet radiation	الأشعة فوق البنفسجية
Valence band	حزمة التكافؤ
Visible radiation	الأشعة المرئية
Volumetric detector	الكاشف الحجمي
Voxel	الفوكسل (نقطة حجمية)
Waveguide	الدليل الموجي
Wavelength	طول الموجة
Xenon lamps	مصابيح الزينون
X-rays	الأشعة السينية
Yttrium Aluminum Garnet (YAG)	عقيق الإيتريوم والألمنيوم
2D-CPC (two-dimensional compound parabolic concentrator)	مُرَكِّز ذو قطع مكافئ ثنائي الأبعاد
3D-CPC (three-dimensional compound parabolic concentrator)	مُرَكِّز ذو قطع مكافئ ثلاثي الأبعاد

المقدمة العامة

المقدمة العامة

يومًا بعد يوم، تُستنفذ مصادر الطاقة الأحفورية في جميع أنحاء العالم. ولهذا تزداد أهمية التوجّه نحو استخدام الطّاقات المتجدّدة خاصة الطاقة الشمسيّة، كونها طاقة اقتصادية، نظيفة ومتوفرة. يمثل الليزر الذي يتمّ ضخّه بالطاقة الشمسيّة (SPL: Solar-pumped laser) أو ما يُدعى "بالليزر الشمسي" وسيلة واعدة لاستخدام الطاقة الشمسيّة. يُمكن لليزر الشمسي تحويل الإشعاع الشمسي غير المتناسك (غير المترابط) من الشمس إلى إشعاع ليزر متناسك (مترابط) عالي السطوع، دون الحاجة إلى مصادر تحفيز مكلفة.

أُعلن عن أول ليزر شمسي من طرف Young و زملائه باستعمال (عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم Nd:YAG; [1])، والذي تم اختياره لخصائصه (الحرارية، الميكانيكية ...) بُغية تقادي التلف والتشوه الناتج عن ارتفاع درجة الحرارة المولّدة جرّاء تركيز الأشعة المُسلّطة عليه وكذلك الضّغوطات الميكانيكيّة التي يتعرّض لها. بفضل استخدام Nd:YAG كوسط فعّال، وتحسين نظام التركيز الضوئي، تم تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي تدريجيًا في السّنوات الأخيرة. كما يلي:

الوسط الفعّال Nd:YAG: تم تحسين كفاءة تجميع الليزر (CE: collection efficiency)؛ وهي نسبة استطاعة خرّج الليزر الشمسي (SPL output power) على مساحة تجميع الطاقة الشمسيّة (solar collection area)؛ من قيمة 19.3W/m^2 لـ Liang و Almeida في عام 2011 [2]، حتى الوصول لأعلى كفاءة تجميع لنظام بلورة Nd:YAG بقيمة 32.1W/m^2 أُعلن عنها من طرف Guan و زملاؤه عام 2018 [3]. رُغم الخصائص الجيدة لـ Nd:YAG، فإنّ نسبة التداخل لطيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي صغيرة نسبيًا [4]. من أجل تعريض نسبة تداخل طيف الامتصاص لـ Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي، ظهرت فكرة التّطعيم المُضاعف بأيونات الكروم Cr^{+3} [5] أو بأيونات السيريوم Ce^{+3} [6].

الوسط الفعّال Cr:Nd:YAG: عام 2007، حصل Yabe و زملاؤه على كفاءة تجميع قدرها 18.7W/m^2 [7]. ثم توالى أعمال التّحسين حتى سنة 2018، حيث كان Liang و زملاؤه قادرين على تسجيل رقم قياسي في كفاءة التجميع لنظام السيراميك Cr:Nd:YAG يبلغ 32.5W/m^2 [5]. على الرّغم من أنّ إضافة أيونات Cr^{+3} كمواضع مُطعمّة إلى Nd:YAG يُوسّع نطاق الامتصاص الخاصّ به [8]، فإنّ التّحسّن في الأداء الذي كان مُتوقّعًا لليزر الشمسي استنادًا إلى ضخّ قضبان السيراميك Cr:Nd:YAG لم يتحقّق بسبب التّأثيرات الحرارية و الضّياعات الناتجة عن التشنّج لهذه المادّة [7].

الوسط الفعّال Ce:Nd:YAG: أصبحت بلّورة Ce:Nd:YAG محور اهتمام متزايد منذ أن تم تأكيد التّقلّ الفعّال للطاقة من أيونات Ce^{+3} إلى Nd^{+3} ، و تُبِت تمرّكّز طيف الامتصاص الخاصّ بها بوضوح عند 339nm و 460nm [9-12]. استخدَم Payziyev و زملاؤه نموذج محاكاة لإثبات أن كفاءة الطاقة الشمسية لليزر من نوع Ce:Nd:YAG كانت ضعف تلك الموجودة في الليزر الشمسي Nd:YAG [13]. أُعلن عن أول ليزر شمسي Ce:Nd:YAG من طرف Vistas و زملاؤها في عام 2020، حيث تمّ الحصول على كفاءة تجميع قدرها 4.9W/m^2 [6]. و بعد عدّة تحسينات، تحصّلت Vistas و زملاؤها على كفاءة تجميع تبلغ 23.6W/m^2 في عام 2021 [14]. صمّم Garcia و زملاؤه رأس ليزر شمسي Ce:Nd:YAG، وحصلوا على كفاءة تجميع (CE) ذات 38.22W/m^2 و ذلك بـ 249W فقط من طاقة الضخّ الشمسي المُدخلة [15]. في سنة 2022، قام Liang و زملاؤه بضخ طرفي-جانبي لثلاثة قضبان Ce:Nd:YAG داخل تجويف ضخّ مخروطي واحد و حصلوا على كفاءة تجميع تبلغ 41.25W/m^2 ، وهو

الرقم القياسي الحالي لليزرات الشمسية [16]. في السنة الحالية (2023)، قام Cai وزملاؤه بتصميم أول ليزر شمسي Ce:Nd:YAG باستعمال عدسة فريزل ذات مساحة قدرها 0.69m^2 كنظام تجميع وتركيز للطاقة الشمسية، حيث تم الحصول على كفاءة تجميع قدرها 38.8W/m^2 ، وهي أعلى بمقدار 1.21 مرة من أعلى قيمة تم الاعلان عنها سابقاً لنظام بعدسة فريزل كمركز شمسي. كما تمثل هذه القيمة كذلك رقماً قياسياً جديداً لأشعة الليزر الشمسي أحادي الحزمة [17].

الإشكالية: رغم الخصائص الجيدة لـ Nd:YAG، إلا أنّ له نطاق تداخل ضيق لطيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي، وبالتالي يبقى استغلال طاقة الاشعاع الشمسي ضعيفاً واستطاعة الليزر المنبعث صغيرة نسبياً. لذلك نستخدم تقنية التطعيم المضاعف بالسيريوم (Ce) بغية تعريض نسبة التداخل لطيفي الامتصاص والانبعاث الشمسي. وهذا للحصول على منظومة ليزر شمسي اكثر كفاءة بالوسط الفعال Ce:Nd:YAG، حيث نستعمل البرنامجين Zemax® و LASCAD™ للنمذجة والمحاكاة العددية.

الهدف: يتم التركيز، في هذا العمل، على تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي باستخدام تقنية التطعيم المضاعف لـ Nd:YAG بالسيريوم (Ce: Cerium) و دراسة مساهمة هذا الأخير في عملية التحسين.

تنقسم هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول:

الفصل الأول: تتم فيه دراسة نظرية الليزر (خصائص الأشعة الليزرية، شروط الانبعاث الليزري، أنواع الأنظمة الليزرية...)، والليزر الشمسي (منظومة الليزر الشمسي، طرق الضخ الشمسي...).

الفصل الثاني: يتم تقديم لمحة عن الإشعاع الشمسي، بالإضافة إلى دراسة عامة حول ليزرات الحالة الصلبة خاصة الوسطين الفعالين Nd:YAG و Ce:Nd:YAG.

الفصل الثالث: أولاً، يتم القيام بدراسة محاكاة لمنظومة ليزرية باستعمال برنامج Zemax® بهدف الحصول على الاستطاعة الممتصة من قبل الوسطين الفعالين Nd:YAG ثم Ce:Nd:YAG. في كل حالة، يُستخدم برنامج LASCAD™ بهدف الحصول على استطاعة الليزر الشمسي الناتج. وفي الأخير، تتم مناقشة النتائج.

تُختتم المذكرة بخاتمة عامة حول أهم النتائج المتوصل إليها.

الفصل الأول

الليزر والليزر الشمسي

1.I مقدمة

أعطى اينشتاين الأساس النظري للانبعاث المحفّز للإشعاع في عام 1917. و سنة 1960، أُنتج أول ليزر من قبل العالم ميمان (Maiman) بالضّخ الضوئي لبُورات الياقوت الاصطناعي باستعمال مصباح فاش مُولّدًا اشعاع ليزر أحمر نابض بطول موجي (690nm) [18]. وهو ضوء يمتلك العديد من المميّزات جعلته منذ اكتشافه يُحدث ثورة كبيرة في عالم التكنولوجيا. فتوالت تطوّرات البحث العلمي في مجال الليزر وأصبح التّركيز على الأقل تكلفه والأسرع، فتم استخدام الطّاقة الشمسية كوسيلة ضخ لتوليد الليزر الشمسي سنة 1966 [19].

يتمّ، في هذا الفصل، تقديم فكرة شاملة حول شعاع الليزر وأهم خصائصه المميّزة، بالإضافة أهمّ المعادلات الرياضيّة الأساسيّة المتعلقة بتفاعل المادة - الإشعاع وآليّة توليده. كما يتمّ، أيضًا، التّعريف على مفهوم الليزر الشمسي ومختلف أساليب الضّخ الشمسي.

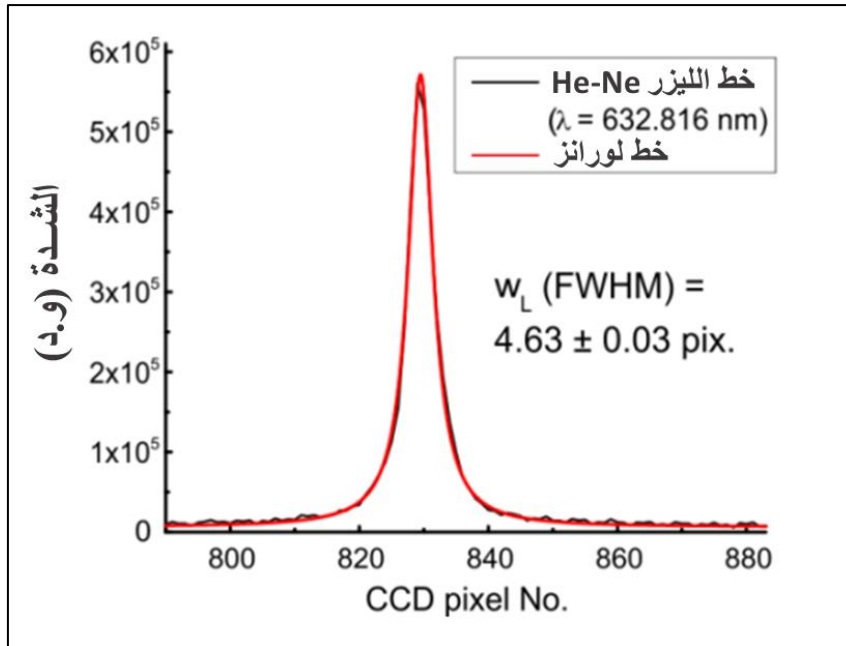
2.I تعريف الليزر

المصطلح بالإنجليزي لضوء الليزر هو: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ويعني "تضخيم الضّوء بواسطة الانبعاث المحفّز"، وهو عبارة عن حزمة ضوئية مركزة ومنتظمة ذات فوتونات تشترك في ترددها وتتطابق موجاتها، بحيث تحدث ظاهرة التداخل البناء بين موجاتها للتحوّل إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية [20].

3.I مميّزات شعاع الليزر

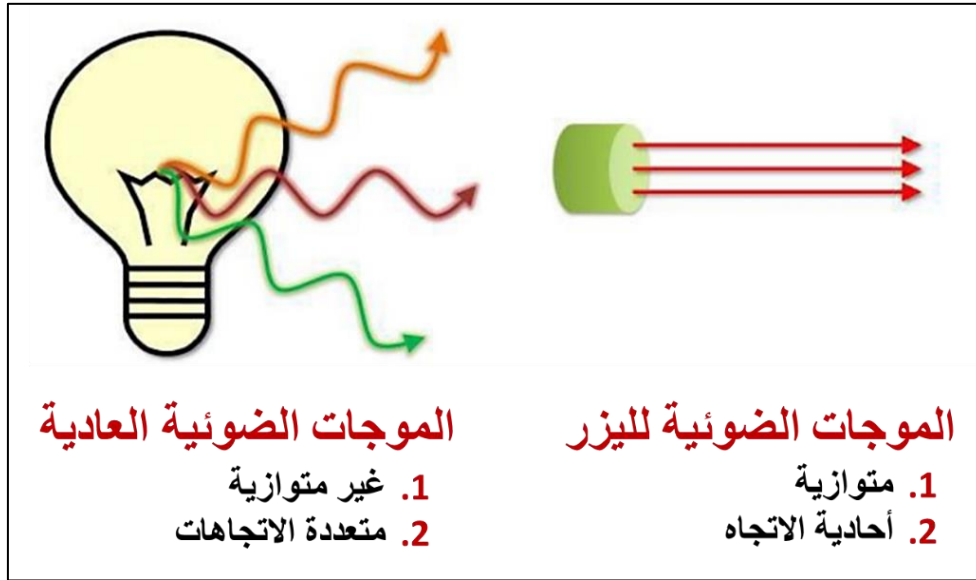
يمتاز شعاع الليزر بعدة مميّزات أساسيّة هي:

1.3.I أحاديّة الطّول الموجي: حيث يتكوّن من حزمة من الترددات الضّوئية الضيقة، أي يظهر ضوء الليزر تقريبًا بلون واحد (تقريبًا أحادي الطّول الموجي)، كما يظهر في الشكل (1.I).



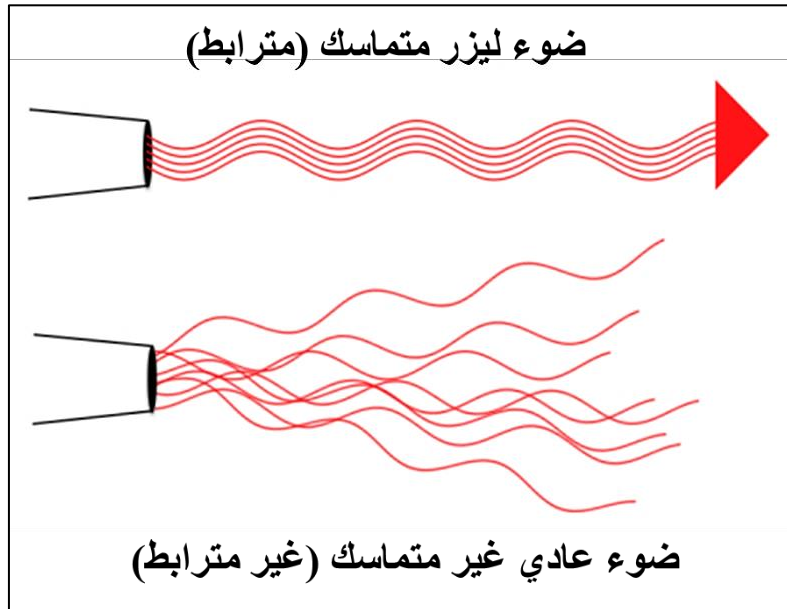
الشكل (1.I): طيف ليزر الهيليوم-نيون [21].

2.3.I الاتجاهية: وهي سمة من سمات ضوء الليزر، وتعني أن زاوية انفراج أشعة الليزر صغيرة جدًا. وهذا ما يسمح له بالانتقال في اتجاه واحد ضمن نطاق ضيق من دون تشتت للطاقة وتغير في الاتجاه، كما يوضحه الشكل (2.I).



الشكل (2.I): صورة توضح تشتت الضوء العادي و اتجاهية ضوء الليزر [22].

3.3.I الترابط: يبرز هذا الترابط عند حدوث الانبعاث المحفز الذي يعد عاملاً أساسياً في تضخيم الضوء. ويعني أن الفرق بين أي نقطتين على موجة شعاع الليزر يكون ثابتاً عند حركة الشعاع زمنياً ومكانياً.



الشكل (3.I): صورة توضح فرق الترابط بين ضوء الليزر والضوء العادي [23].

4.3.I السطوع: شدة الشعاع عالية ومركزة في حزمة ذات قطر ضيق لا يتجاوز الواحد ميليمتر. وبما أن جميع الطاقة الضوئية التي يطلقها الليزر تتمركز في هذا المقطع العرضي الصغير ستظهر بشكل إضاءة أو إشعاع شديد.

4.I مكونات المنظومة الليزرية

تحتوي كل منظومة ليزر على عدة عناصر أساسية، كما يوضح الشكل (4.I)، منها [24]:

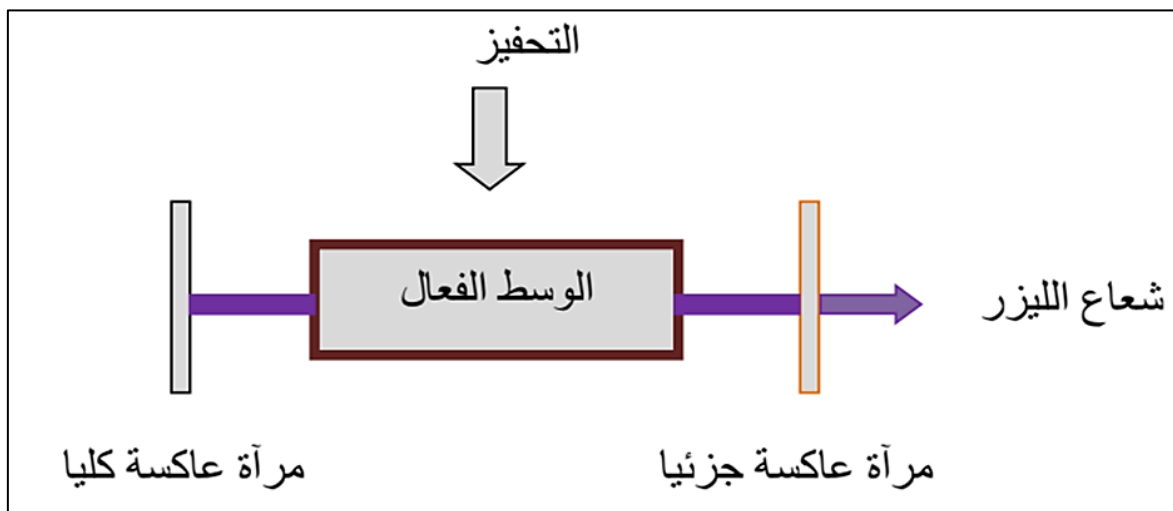
1.4.I الوسط الفعال: هو المادة التي تُستخدم لتوليد الفوتونات، وتكون إما: صلبة، غازية، أو سائلة.

- **المادة الصلبة:** هو وسط بلوري مثل الياقوت الاصطناعي (Ruby) و Nd:YAG وعقيق الألمنيوم، أو وسط زجاجي.
- **المادة الغازية:** مثل خليط غاز الهيليوم-نيون (He-Ne)، غاز أول أكسيد الكربون (CO) وغاز الهيليوم-كاديوم (He-Cd).
- **المادة السائلة:** هي محاليل للأتربة النادرة بحيث يكون هذا المحلول عبارة عن مركب معدني عضوي يكون فيه الأيون المعدني مُحاطًا بذرات الأوكسجين مثل: Nd_2O_3 .
- **ليزر اشباه الموصلات:** المادة الفعالة هي عبارة عن تركيب من مواد شبه موصلة مانحة (n-type) وقابلة (p-type). تمثل حزمة التوصيل (conduction band) مستوي الليزر العلوي، و حزمة التكافؤ (valence band) مستوي الليزر السفلي. ومن أهم هذه المواد: زرنيخيد الجاليوم (GaAs).

2.4.I الضخ (التحفيز): هو إرسال الطاقة من مصدرها إلى الوسط الفعال قصد تحفيز ذراته، وهو عدة أنواع، أهمها [21]:

- **الضخ الضوئي:** هو تسليط الضوء على المادة الفعالة لنقل ذراتها إلى سوية أعلى، وهذه التقنية مناسبة في ليزرات الحالة الصلبة.
- **الضخ الكيميائي:** يتم عن طريق التفاعلات الكيميائية للمادة الفعالة مع مواد أخرى.
- **الضخ الكهربائي:** تُستخدم الطاقة الكهربائية لإثارة ذرات الوسط الفعال.

3.4.I المرنان: هو منظومة مكونة من مرأتين على محور بصري مشترك مع الوسط الفعال حيث تنتقل الفوتونات المؤلدة بين مرأتين ذاهباً وإياباً من أجل تضخيمها. تكون إحدى هاتين المرأتين ذات انعكاسية تامة (الخلفية)، والمرأة الأخرى تكون ذات انعكاسية جزئية (الأمامية) [24].



الشكل (4.I): منظومة الليزر [24].

قبل التطرق إلى شروط الانبعاث الليزري وكذا أنواع الأنظمة الليزرية، نتعرف أولاً على آليات تفاعل المادة - الإشعاع.

5.I آليات تفاعل الإشعاع - المادة

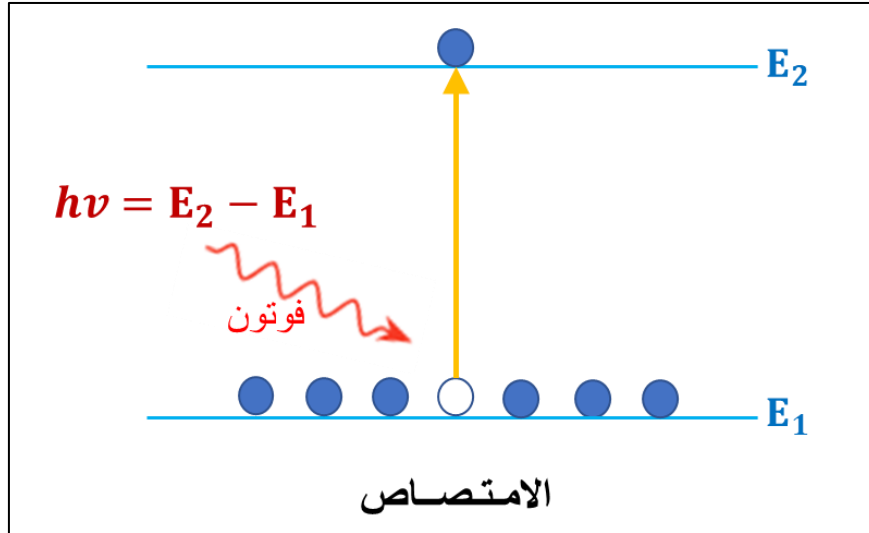
تكون المادة الفعالة في حالة اتزان حراري مستقر؛ أي أن جميع الإلكترونات تكون في المستوي الأساسي. عند ورود إشعاع كهرومغناطيسي عليها بالتردد المناسب ν ، يحدث تحفيز للإلكترونات. تتفاعل المادة مع هذا الإشعاع في ثلاث آليات: الامتصاص، الانبعاث التلقائي و الانبعاث المحفز [25].

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu/kT} \quad (1-I)$$

حيث:

- N_1 : عدد الذرات في المستوي الأدنى $[\text{atom/m}^3]$.
- N_2 : عدد الذرات في المستوي الأعلى $[\text{atom/m}^3]$.
- g_i : انحلال المستوي i .
- h : ثابت بلانك: $h=6.63 \times 10^{-34} [\text{J.s}]$.
- ν : تردد الفوتونات بـ: $[\text{Hz}]$.
- k : ثابت بولتزمان: $k=1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$.
- T : درجة الحرارة بـ: $[\text{K}]$.

الامتصاص: يعتمد على انتقال ذرات المادة من مستوي طاقي E_1 بعد اكتسابها لطاقة E من الوسط الخارجي (المحيط) إلى مستوي طاقة أعلى E_2 ، شرط أن يكون: $E \geq E_2 - E_1$ [26]. كما يوضح الشكل (5.I).



الشكل (5.I): آلية حدوث الامتصاص [25].

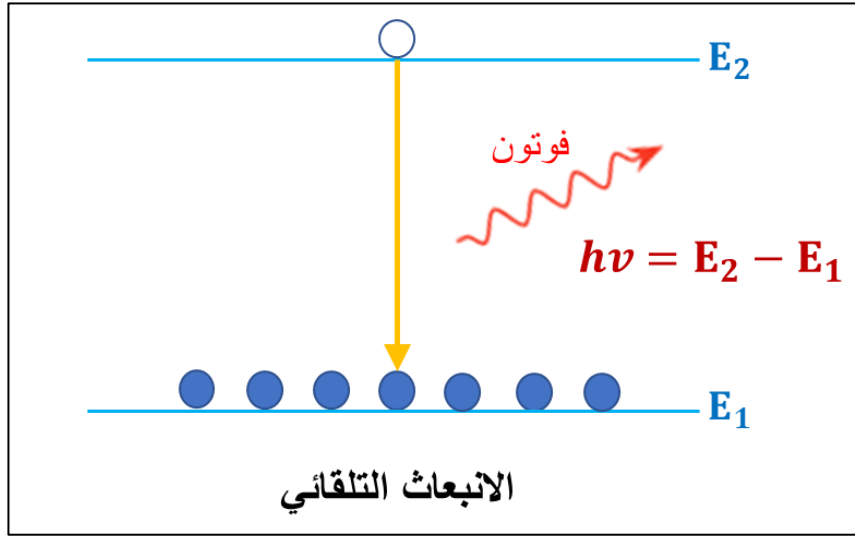
تُعرّف نسبة الانتقال من المستوي الأدنى إلى المستوي الأعلى بالمعادلة التالية [25]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}\rho(\nu)N_1 = -W_{12}N_1 \quad (2-I)$$

حيث:

- W_{12} : احتمال الإثارة (الامتصاص) لوحدة الزمن، و وحدته: $[\text{s}^{-1}]$.
- B_{12} : معامل أينشتاين لعملية الامتصاص المُحفّز و وحدته: $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}]$.
- $\rho(\nu)$: كثافة طاقة الإشعاع الوارد و وحدتها: $[\text{J} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}]$.

الانبعاث التلقائي: هو عملية فقدان الطاقة من المادة بشكل تلقائي وبدون تأثير خارجي ويكون على شكل ضوء. بحيث تعود الإلكترونات لوضع الاستقرار تلقائياً وتعطي فوتوناً بطاقة الممتصة سابقاً [26]. كما يُوضح الشكل (6.I).



الشكل (6.I): آلية حدوث الانبعاث التلقائي [25].

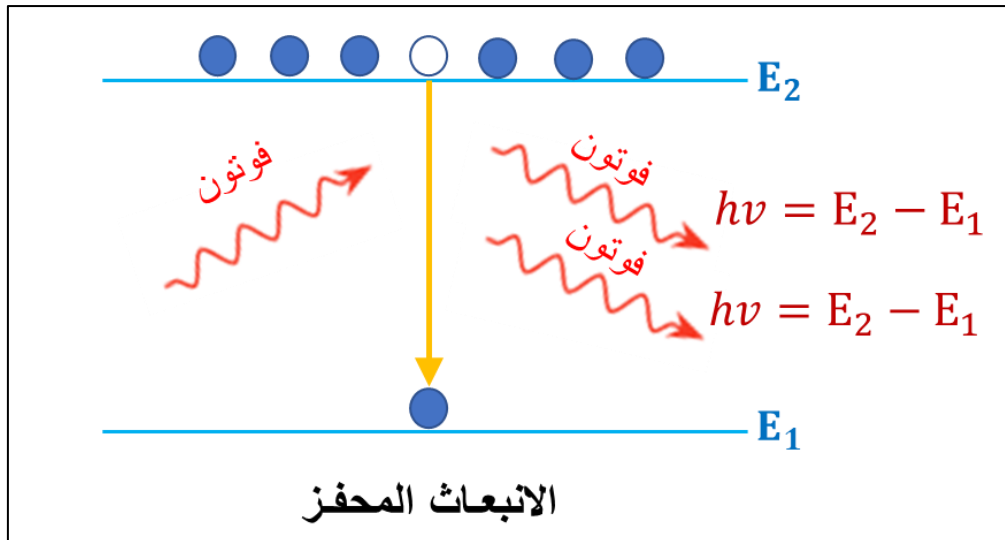
تُعرّف نسبة الانتقال من المستوي الأعلى إلى المستوي الأدنى بالمعادلة التالية [25]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 = \frac{1}{\tau_{rad}}N_2 \quad (3-I)$$

حيث: A_{21} : معامل اينشتاين للانبعاث التلقائي، و وحدته: $[s^{-1}]$.

τ_{rad} : زمن مكوث أو عمر الطبقة، وحدته: $[s]$ ، وعبارته هي: $\tau_{rad} = \frac{1}{A_{21}}$.

الانبعاث المحفز: عندما تكون المادة مثارة أي أنّ الإلكترونات تكون في المستوي المثارة E_2 ويمرّ بها فوتون ذو طاقة $h\nu = E_2 - E_1$ يحفزها على النزول للمستوي الاساسي E_1 قبل انتهاء زمن مكوثها في تلك الطبقة، محرراً فوتونين يمتلكان نفس الطاقة $h\nu$ وب نفس الخصائص الموجية [26]. كما يُوضح الشكل (7.I).



الشكل (7.I): آلية حدوث الانبعاث المحفز [25].

تُعطى نسبة الانتقال من المستوي الأعلى إلى المستوي الأدنى بالمعادلة التالية [25]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho(\nu)N_2 = -W_{21}N_2 \quad (4-I)$$

حيث: W_{21} : احتمال الانبعاث المحفّز لوحدة الزمن، و وحدته: $[s^{-1}]$.

B_{21} : معامل اينشتاين للانبعاث المحفّز، و وحدته: $[m^3 \cdot s^{-2} \cdot J^{-1}]$.

نسبة معاملات اينشتاين: تعطينا هذه النسبة فكرة جيّدة عن احتماليّة حدوث الامتصاص أو الانبعاث التلقائي أو الانبعاث المحفّز المُعطى بالمعادلة [27]:

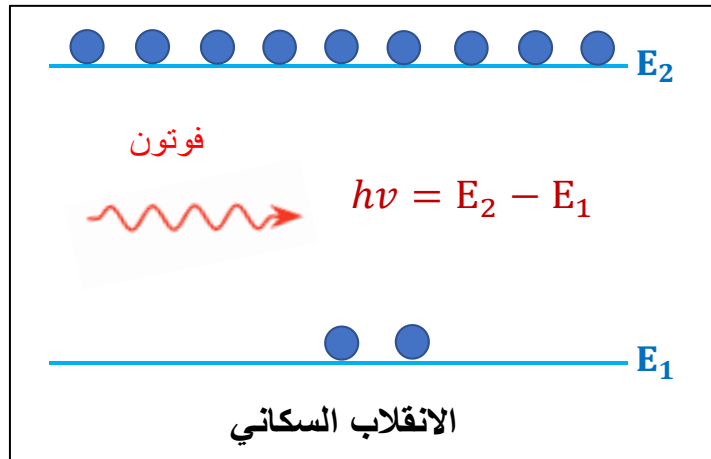
$$\frac{A}{B} = \frac{8h\nu^3 n^3}{c^3} \quad (5-I)$$

حيث: n : قرينة انكسار الوسط الفعّال.

c : سرعة الضوء في الفراغ و وحدته: $c=3 \times 10^8 [m/s]$.

6.I شروط الانبعاث الليزري

- **الانبعاث المحفّز:** معظم الذرّات في الطّروف الطبيعية تكون إلكتروناتها في مستوى طاقة منخفض، حيث تكون مستقرّة، ولكن يمكن أن يكون بعضها في حالة إثارة؛ أي أنّ إلكتروناتها تكون في مستوى طاقة أعلى. يمكن أن تعود هذه الإلكترونات إلى مستوى طاقة منخفض محرّرة طاقة على شكل فوتونات حيث يمكن أن يكون هذا الرجوع مُحفّزاً بواسطة فوتون فيحصل تضخيم للأضواء [28].
- **تضخيم الأضواء:** يُمكن الانبعاث المحفّز من تضخيم الأضواء، حيث يسمح تحفيز الإلكترونات المُثارة من انبعاث مضاعف للفوتونات المحفّزة والفوتونات الناتجة عن رجوع الإلكترونات المُثارة إلى حالة الاستقرار (مستوي طاقة أدنى) [28].
- **التّعداد السّكاني المعكوس:** يُمكن للفوتونات المُسلّطة على المادّة أن تثير الإلكترونات، فتنتقلها من مستوى طاقة أدنى إلى مستوى طاقة أعلى (امتصاص). كما يمكن أن تحفّز الإلكترونات المُثارة فتنتقلها من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أدنى (انبعاث محفّز). وحتّى نضمن أن يكون الانبعاث المحفّز هو الغالب (تضخيم للأضواء)، يجب أن يكون عدد الإلكترونات المُثارة أكبر من عدد الإلكترونات في مستوى الطاقة الأدنى، وهو ما يسمى بالانقلاب السّكاني أو التّعداد السّكاني المعكوس كما هو مُوضح في الشكل (8.I) [28].

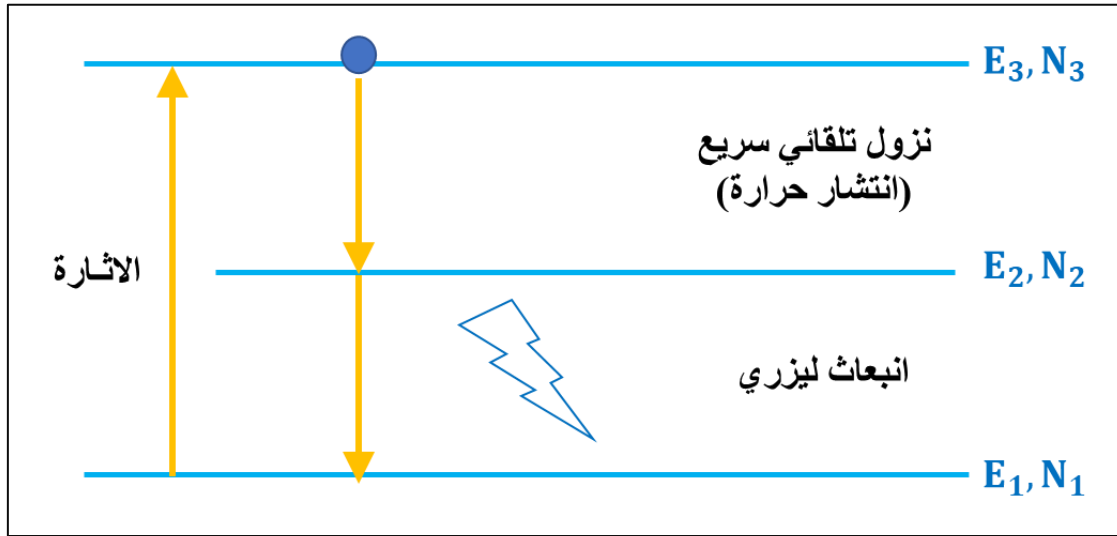


الشكل (8.I): التّعداد السّكاني المعكوس [25].

7.1 أنواع الأنظمة الليزرية

1.7.I منظومة ثلاثية المستوى

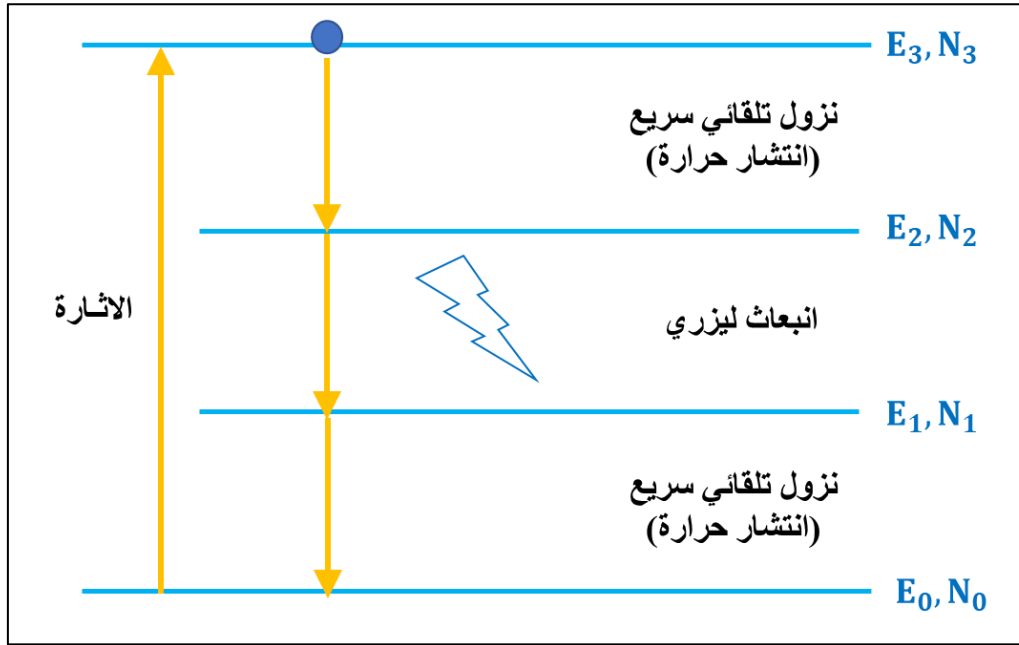
يَعتمد توليد الليزر في المنظومة ثلاثية المستوى على انتقال ذرات الوسط الفعال بين ثلاث مستويات للطاقة كما يُبينه الشكل (9.I)، المستوي الأرضي الذي يمثل المستوي الليزري السفلي E_1 ، والمستوي المثار E_3 ، والمستوي شبه المستقر الذي يمثل المستوي الليزري العلوي E_2 (مدة حياة المستوي E_2 تكون أكبر من مدة حياة المستوي E_3). فعندما تكون معظم الذرات موجودة في المستوي المستقر، يعني ذلك أن الوسط الفعال في حالة استقرار. أما عند إثارته بواسطة إحدى طرق الإثارة المناسبة فإنّ هذه الذرات تنتقل إلى المستوي المثار لتنتقل بشكل تلقائي وسريع جدا إلى المستوي شبه المستقر مُحَرِّرة طاقة على شكل حرارة، ثم بعد ذلك تعود إلى المستوي الأرضي مُحَرِّرة طاقة على شكل انبعاث ليزري. ولضمان توليد الليزر ينبغي أن تكون طاقة الإثارة كافيةً لتحقيق الانقلاب السكاني [29].



الشكل (9.I): نظام ذو ثلاث مستويات طاقة [25].

2.7.I منظومة رباعية المستوى

تتميز المنظومة رباعية المستوى (الشكل (10.I)) بسهولة الحصول على الانقلاب السكاني باستعمال طاقة ضخ ضعيفة، مقارنة بالمنظومة ثلاثية المستوى. ويعود سبب ذلك إلى وجود مستوي إضافي E_1 ؛ الذي يكون فارغا في أغلب الأحيان، ويقع فوق المستوي الأرضي E_0 مباشرةً، ويمثل المستوي الليزري السفلي. عند إثارة المادة الفعالة تنتقل الذرات إلى مستوي الطاقة E_3 ، وسرعان ما تنزل هذه الذرات تلقائياً إلى المستوي E_2 مُحَرِّرة طاقة على شكل حرارة (مدة حياة المستوي E_2 تكون أكبر من مدة حياة المستوي E_1). قصر مدة حياة المستوي E_1 يترتب عنه التفريغ السريع لهذا المستوي في المستوي الأرضي E_0 مباشرةً. ممّا يؤدي إلى تجمع الإلكترونات في المستوي E_2 على حساب المستوي E_1 ، وهذا ما يُحقق الانقلاب السكاني بين هذين المستويين (أي E_1 و E_2)، كما يوضح الشكل (10.I). عند انتقال الذرات الموجودة في المستوي E_2 إلى المستوي E_1 تُنبعث فوتونات الليزر [29].



الشكل (10.I): نظام ذو أربعة مستويات طاغوية [25].

لقد تم التطرق إلى عملية الضخ (التحفيز) في العنصر 2.4.I، فهو يكون إما كهربائياً أو كيميائياً أو ضوئياً. وعرفنا أن الضخ الضوئي مناسب بصورة خاصة في حالة الليزر الصلبة، وعندما يكون مصدر الضخ هو الإشعاع الشمسي يسمى الليزر بالليزر الشمسي.

8.I الليزر الشمسي

1.8.I تمهيد

يُعدّ الليزر المضخّ بضوء الشمس (Solar Pumped Laser، اختصاراً (SPL)) مباشرةً من التقنيات المناسبة التي يمكنها تحويل ضوء الشمس واسع النطاق الترددي إلى ليزر ضيق النطاق. بالمقارنة مع الليزر التي تعمل بالكهرباء، فإن الليزر الشمسي أبسط وموثوق به كثيراً بسبب الإزالة الكاملة لمعدات توليد الطاقة الكهربائية وتكييفها، مما يوفر احتمال حدوث انخفاض كبير في تكلفة الإشعاع البصري المتماسك (المتربط) لتطبيقات الطاقة العالية والمتوسطة. وهذا ما يؤدي إلى العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية في السنوات القادمة.

2.8.I مكونات تقنية الليزر الشمسي

تتكوّن منظومة الليزر الشمسي من عدّة أجزاء لها دور أساسي في تحقيق غاية المنظومة، ويمكن تصنيفها كما يلي:

1. منظومة التركيز الأولية.
2. منظومة التتبع.
3. منظومة التركيز الثانية.
4. وسط الليزر (الوسط الفعال).
5. منظومة التبريد.
6. مرنانة الليزر أو التجويف الرنيني.

1.2.8.I منظومة التركيز الأولية (Primary stage concentrator)

يُصنّف الليزر الشمسي ضمن ليزرات الحالة الصلبة والتي يتم ضخها عادةً بالضوء، أين يستعمل هنا ضوء الشمس لعملية الضخ. نظرًا لأن الضوء الطبيعي لا يُوقَر تدفقًا كافيًا لتحقيق كثافة ضخ أكبر من العتبة اللازمة لإثارة وسط التضخيم لنظام الليزر، تتطلب معظم أجهزة الليزر التي يتم ضخها بضوء الشمس عامل تركيز بالآلاف للحصول على مكاسب كافية في الوسط النشط المشع. لذلك هناك حاجة إلى بصريات عالية التركيز الشمسي. في بداية الامر، كان استخدام المرايا ذات القطع المكافئ أكثر انتشارًا حتى سنة 2007. بعد استخدام عدسات فريزل كمرکزات أولية للطاقة الشمسية زادت كفاءة تجميع الليزر الشمسي بشكل كبير [8]، والتي دفعت الباحثين في مجال الطاقة الشمسية إلى التخلي عن مزايا المرايا ذات القطع المكافئ بعض الوقت. على الرغم من أن عدسات فريزل فعالة من حيث التكلفة ويمكن تصنيعها بأحجام كبيرة، إلا أن الإشعاع المنتشر إلى حد كبير على طول المنطقة البؤرية يعوق تركيز الضوء الفعال إلى وسط الليزر الصغير والرقيق. وبالتالي لتحقيق كفاءة ليزر شمسي أعلى باستخدام عدسة فريزل، فإن القضيب الأكبر يكون أكثر ملاءمة [8]، [30-32]، مما يجعله بدوره أقل مقاومة للإجهاد الحراري. وبدلاً من ذلك، تسمح المرايا ذات القطع المكافئ بتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي الوارد.

2.2.8.I منظومة التتبع الشمسية (Solar tracking system)

نظام التتبع هو جهاز متطور يتكون من دوائر تحكم إلكترونية وعناصر ميكانيكية توجه المُرْكُز أو المرايا العاكسة نحو الشمس في جميع الأوقات من شروق الشمس إلى غروبها. توجد فئتان رئيسيتان من آليات التتبع: المتتبع أحادي المحور والمتتبع ثنائي المحاور. كما يوحي الاسم، فإن المتتبع أحادي المحور لديه درجة واحدة من حرية الدوران حول محور مواز تقريبًا لمحور دوران الأرض الذي يسمح له بمتابعة حركة الشمس من الشرق إلى الغرب خلال النهار. يتعدّر على أجهزة التتبع أحادية المحور تتبع الشمس بدقة مطلقة بسبب الاختلاف الموسمي لإمالة المستوى الاستوائي للأرض فيما يتعلق بالمستوى المداري للأرض. نظرًا لوجود درجتين من حرية الدوران، فإن أجهزة التتبع ثنائية المحاور قادرة على المحاذاة المثالية مع الشمس في جميع الأوقات، مما يوفر الأداء الأمثل على مدار العام. تُستخدَم متعقبات الشمس لزيادة كفاءة منظومة الليزر الشمسي [33].

3.2.8.I منظومة التركيز الثانية (Second-stage concentrator)

نظرًا لصغر قطر قضيب الليزر، تحتاج منظومة الليزر الشمسي لأنظمة تركيز إضافية تتمثل عادة في: عدسات محدّبة من السيليكا، مخاريط من السيليكا، مرايا مخروطية، مرايا من نوع 2D-CPC و 3D-CPC، وادلة موجية، ألياف بصرية. بالإضافة إلى ذلك تحتوي منظومة التركيز الثانوية على تجويف بصري يتكون عادة من مرايا مخروطية أو مرايا من نوع 2D-CPC و 3D-CPC أو مرايا على شكل حرف V. تعمل هذه المُرْكُزات على زيادة تركيز وتوجيه ضوء الشمس المُرْكُز نحو قضيب الليزر، كما تلعب هذه المُرْكُزات دور التّجْوِيف الذي يجتازه ماء التبريد [33].

4.2.8.I الوسط الليزري (المادة الفعالة)

تم اعتبار الليزر السائل والغاز كمرشحين لليزر الشمسي [34-36]. ومع ذلك فقد تقاربت أبحاث الليزر الشمسي بشكل أساسي في الأنظمة ذات الحالة الصلبة، خاصة Nd:YAG [1] و Cr:Nd:YAG [5]. عُرِفَت الخصائص المواتية لإحداث الفعل الليزري لأيون النيوديميوم، بشكل استثنائي، في مرحلة مبكرة في أنظمة الليزر Nd:YAG الأولى التي تم ضخها بالطاقة الشمسية. فأتثناء البحث عن مواد ليزرية صلبة، أبدى أيون النيوديميوم Nd^{+3} مدى حياة فلورية طويلة، وضيقًا في عرض الخطوط الفلورية للبلورات مع بنية

منتظمة. كما أنه يمتلك مستوى حديًا للانتقالات الليزرية عاليًا بما فيه الكفاية فوق المستوى الأرضي. لذا كان تشغيله بالنمط ذو الموجة المستمرة (cw: contineous wave) ممكنًا وبسهولة حتى في درجة حرارة الغرفة. لهذا تم دمج هذا الأيون كمُطعم في مجموعة متنوعة من المواد المُستضيفة: كالزجاج، CaWO_4 ، LaF_3 ، CaF_2 ، CaMoO_4 ، في محاولة للاستفادة من مزاياه الكثيرة. ومع ذلك، فإن معظم هؤلاء المُضيفات أبدت، بشكل مبكر، أوجه قصور غير مرغوب فيها؛ إما من جهة خواصها الفيزيائية الجوهرية أو بسبب طريقة تفاعلها مع الأيون. أخيرًا، تم اكتشاف عقيق الايتريوم و الألمنيوم (YAG) من قبل Geusic ومن معه كمُضيف وتم شرح مدى تفوقه على المواد المُضيفة الأخرى [25].

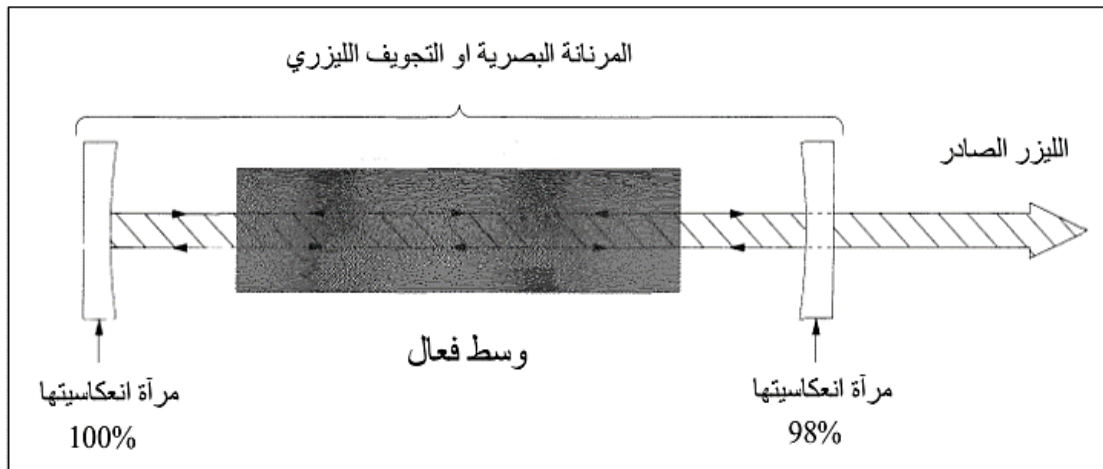
حقّق YAG مكانةً مهيمنة بشكل خاص وسط المواد الليزرية للحالة الصلبة. حيث يتميز بشدة صلابته، وبلورته متماثلة المناحي، والتي يمكن أن تُعالج وتُصنّع بطريقة تُنتج قضبانًا عالية الجودة البصرية. تُعتبر بلورة YAG، في الوقت الحالي، أفضل بلورة مُستضيفة تجارية متوفرة لـ Nd^{+3} . فهي توفر عتبة منخفضة ورجحًا مرتفعًا [25].

5.2.8.I منظومة التبريد (Cooling system)

يُعدّ الاختلاف بين طاقة ضخ الفوتونات وطاقة فوتونات الليزر في الليزر ذو الحالة الصلبة الذي يتم ضخه بصريًا هو السبب الرئيسي للحرارة المتولدة في الشبكة البلورية لوسط الليزر. بالإضافة إلى الحرارة الناتجة عن الانتقالات غير الليزرية (non-laser) والاسترخاء غير الإشعاعي وكذلك امتصاص إشعاع الضخ بواسطة المادة المُضيفة. يؤدي امتصاص البلورة للضوء إلى زيادة درجة حرارتها. وإذا زادت درجة حرارتها، ينخفض تحويلها البصري بسرعة كبيرة ($>>30\%$). لذلك من الضروري الحفاظ على البلورة عند درجة حرارة منخفضة وثابتة لتجنب تلفها ووجود نفس قيمة التحويل. لذلك يكون من المفيد تبريد بلورة الليزر. فهذا يضمن تشوّهًا أقل للبلورة وبالتالي يمكن الحصول على جودة أفضل لشعاع الليزر [24].

6.2.8.I مرئانة الليزر أو التجويف الليزري

إنّ عملية التذبذب الفوتوني (Photonic oscillation) تتطلب وجود تغذية عكسية (Feedback) لإدامة التذبذب. وإنّ التغذية العكسية في منظومة الليزر تتم باستخدام تجويف بصري يسمى المرئان (Resonator)، ويتألف من مرأتين تنتقل بينهما الفوتونات المتولدة ذهابًا وإيابًا على طول المحور البصري للتجويف [21]. كما يوضح الشكل (11.I).



الشكل (11.I): رسم تخطيطي لمرئان الليزر [37].

3.8.I طرق ضخ الليزر الشمسي

لقد تم التطرُّق إلى عملية الضخ في الليزر في العنصر 2.4.I، مع أنواع منظومة الليزر في العنصر 7.I. وعرفنا الضخ على أنه عملية يتم فيها رفع الذرات من السَّوية 1 إلى السَّوية 3 (في حالة ليزر ذي ثلاث سوَّيات)، أو من السَّوية 0 إلى السَّوية 3 (في حالة ليزر ذي أربع سوَّيات). تتم هذه العمليات بإحدى الطُّرق التالية:

1.3.8.I الضخ غير المباشر

عند الضخ الشمسي غير المباشر، يُضِيء الإشعاع الشمسي الخلايا الشمسية لإنتاج الكهرباء التي تُشغِّل ليزرات الصَّمام الثنائي. أهم مشاكل طريقة الضخ غير المباشر خاصَّة في التطبيقات الفضائية لليزر الشمسي يتمثل أساسًا في أحد أوجه القصور في مصفوفات أشباه الموصلات؛ و التي هي محدودية عمرها الافتراضي وتدهور الأداء بمرور الوقت (والذي يبدو أنه يتناسب مع مستوى متوسط طاقة الليزر الصَّادرة). بالنسبة لأنظمة الليزر عالية الطاقة، يُعدَّ عمر هذه الأجهزة أحد العوامل الرئيسيَّة التي تُحدِّد من عمر نظام الليزر بأكمله لمدة 3 سنوات تقريبًا [38].

2.3.8.I الضخ المباشر

يُمكن ضخ الليزر بشكل مباشر بضوء الشمس. ويتم ذلك عن طريق وضع رأس الليزر، الذي يحتوي على الوسط الفعَّال، في البقعة البؤريَّة لمُرَكِّز شمسي أولي لأن ضوء الشمس المباشر لا يوفر تدفقًا كافيًا لإحداث الفعل الليزري. إنَّ الضخ المباشر بالطاقة الشمسية يوفر خطوتين لتحويل الطاقة، وبالتالي فهو بطبيعته أكثر كفاءة، وأبسط بكثير وأكثر موثوقية. إنَّ تجنب ليزر أشباه الموصلات تمامًا عن طريق الضخ الشمسي المباشر لليزر الحالة الصَّلبة يُظهر إمكانية التغلُّب على القيود الحاليَّة، ممَّا يُتيح عملية ليزر موثوقة محمَّولة في الفضاء على مدى عدَّة سنوات [38].

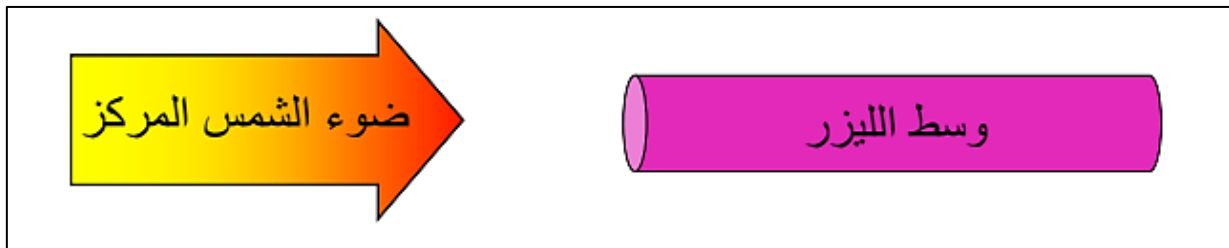
3.3.8.I آليات الضخ المباشر لليزر الشمسي

اقتصرت على آليتين هما:

- الضخ الطَّرَفي - الجانبي (الطولي) (The end-pumping).
- الضخ الجانبي (المستعرض) (The side-pumping)

(أ) الضخ الطَّرَفي - الجانبي

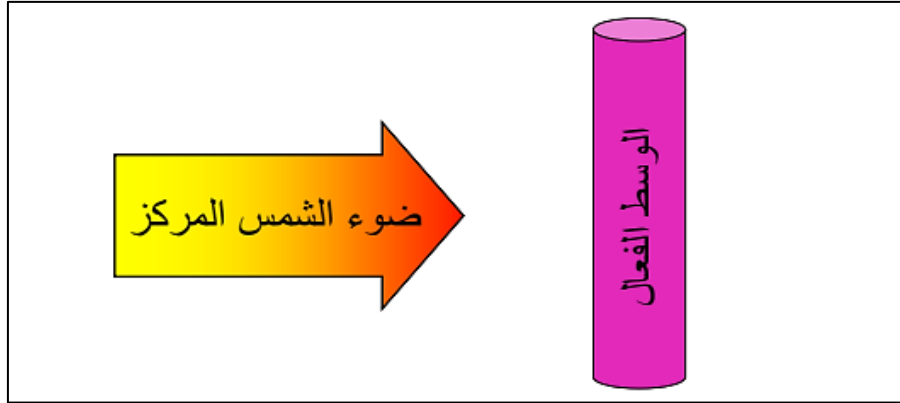
يتم في هذه الحالة توجيه ضوء الشمس المُرَكِّز نحو أحد أطراف وسط الليزر الأسطواناني، الذي يكون مقترنا بفتحة اخراج لمُرَكِّز ثاني؛ قد يكون دليل ضوئي من السيليكا، أو عدسة كروية أو شبه كروية، أو ألياف بصرية، مرآة مخروطية أو من نوع 3D-CPC [39]. يُوضَّح الشكل (12.I) تصميمًا تخطيطيًا لنظام توليد الليزر الشمسي باستخدام تقنيَّة الضخ الطَّرَفي - الجانبي.



الشكل (12.I): رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطَّرَفي-الجانبي لليزر الشمسي [39].

(ب) الضّخّ الجانبي

يتمّ، في طريقة الضّخّ الجانبي، توزيع ضوء الشمس المُركّز على السّطح الجانبيّة لوسط الليزر أسطوانيّ الشكل. إضافةً إلى المُركّز الأوّل، يتم استخدام مُركّز ثاني من النوع 2D-CPC، أو تجويف بصري بأشكال 2V، أو مرآة مخروطية... إلخ، لتوزيع ضوء الشمس بشكل مُوحّد على طول قضيب الليزر [39]. يوضّح الشكل (13.I) تصميمًا تخطيطيًا لنظام توليد ليزر شمسي باستخدام تقنيّة الضّخّ الجانبي.



الشكل (13.I): رسم تخطيطي لمبدأ الضّخّ الجانبي لليزر الشمسي [39].

4.8.1 تطبيقات الليزر الشمسي

نذكر من بين التّطبيقات الفضائيّة المُحتملة لليزر الشمسي؛ الاستشعار عن بعد من الفضاء، اتّصالات الفضاء السّحيق وأشعة الليزر اللاسلكيّة للطاقة الفضائيّة [40]، حرف مسار الكويكبات، أجهزة الدّفع الضوئيّة الخالية من الوقود [41]، وإزالة الحطام الفضائي المداري [2]، [42].

يحتوي الليزر الشمسي أيضًا على إمكانيات كبيرة للتطبيقات الأرضيّة؛ مثل المُعالجة الليزرية للموادّ وإنتاج الموادّ الدّقيقة/النّانوية ودورات الطاقة المتجدّدة. تم مؤخرًا إيلاء اهتمام خاصّ لدورة المغنيسيوم المتجدّدة (Mg) – الهيدروجين (H_2)، التي قد تقودنا إلى حضارة مستقبلية خالية من الوقود الأحفوري قائمة على (Mg) [43]. تُنبعث كمّيّات كبيرة من الحرارة و H_2 من تفاعل المغنيسيوم مع الماء. يتّمع Mg بإمكانات كبيرة كمصدر للطاقة لأنه يحتوي على كثافة تخزين طاقة أعلى بعشر مرّات من كثافة H_2 . يُمكن تخزينه ونقله بسهولة على شكل "كُريّات" وعند الضّرورة يتفاعل مع الماء لإنتاج كل من H_2 والطاقة الحرارية لتطبيقات مركبات خلايا الوقود. ومع ذلك فإنّ حوالي 4000K ضروري لاختزال (MgO) [44]. نظرًا لعدم وجود طريقة عمليّة للوصول إلى درجة الحرارة هذه عن طريق التّركيز المباشر لأشعة الشمس على MgO باستخدام البصريّات التقليديّة، أصبحت أشعة الليزر التي تعمل بالطاقة الشمسية بجودة شعاع ممتازة ضروريّة، حيث يُمكن تركيزها على بقعة صغيرة، تتجاوز 4000K. يتم إرجاع MgO مرة أخرى إلى Mg بواسطة أشعة الليزر [43]، [44].

9.1 خاتمة

تمّ، في هذا الفصل، القيام بمراجعة سريعة لنظريّة الليزر (تعريف ضوء الليزر و أهمّ مميّزاته، آليّات تفاعل الإشعاع-المادّة، شروط الانبعاث الليزري، أنواع الأنظمة الليزرية...)، والليزر الشمسي (مكوّنات تقنيّة الليزر الشمسي، طرق الضّخّ الشمسي، أهمّ التطبيقات...). الفصل المُوالي يُقدّم لمحةً عامّةً حول الشمس والإشعاع الشمسي، ثم يتمّ التطرّق إلى بعض ليزرات الحالة الصّلبة المُستعملة كأوساط فعّالة لإنتاج الليزر الشمسي وكذا أهمّ خصائصها، خاصّة الوسطين الفعّالين: Nd:YAG و Ce:Nd:YAG (ذو التّطعيم المُضاعف بالسيريوم).

الفصل الثَّاني

الاشعاع الشمسي

و ليزرات الحالة الصلبة

1.II مقدمة

تُعدّ الطاقة الواردة إلينا من الشمس واحدة من أهم أنواع الطّاقة التي يُمكن للإنسان استغلالها. فهي تُعتبر طاقة دائمة ونظيفة، حيث لا تتسبب في إطلاق غازات أو ملوّثات ضارّة للبيئة عند استخدامها، وهذا يميزها عن مصادر الطاقة الأخرى مثل النفط والطاقة النووية وغيرها. ولذلك، ارتفعت مكانة الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر وأصبحت تُعدّ واحدة من المصادر الرئيسية للطاقة المُستدامة كما تم تخصيص ميزانيات كبيرة في أغلب الدّول للاستثمار في استغلالها. تنوعت الطّرق المُقترحة للاستفادة من الطاقة الشمسية، بما في ذلك استخدام المرايا العاكسة لتجميع ضوء الشمس و ابتكار طرق عديدة لامتصاص طاقة الشمس ثم تحويلها إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية أو تحويلها إلى أشعة ليزر... إلخ [24].

تُعدّ أشعة الليزر أشعة ذات قدرة ضوئية هائلة، وهي أشعة أحادية اللون، على نحو مترابط وموجّه. للحصول على هذا النوع من الضوء تُستخدم تقنية الضّخ. سعى العلماء لخفض تكلفة إنتاج الليزر عن طريق الحدّ من طاقة الضّخ. وبما أنّ الطاقة الشمسية تُعد مصدر طاقة مستمرة، وفيرة ومجانية، فقد تم استخدامها في عملية الضّخ. لذلك أصبحت تقنية الليزر الشمسي خياراً مثالياً، حيث سمحت بالحصول على طريقة بديلة، بسيطة وغير مكلفة لاستخدام الطاقة الشمسية وتحويلها لأشعة الليزر.

أوائل 1960، تم إجراء العديد من الأبحاث الأولية للضخ بالطاقة الشمسية، حيث استُعمل Nd:YAG ليكون أفضل المواد الليزرية المُضخّة بالشمس بسبب خصائصه المتميزة وقوته الميكانيكية مقارنة مع المواد الأخرى [1]. ومع ذلك، لا يزال يعاني من كفاءة منخفضة في استخدام ضوء الشمس كمصدر لإنتاج الطاقة الليزرية، ولديه نطاقات امتصاص ضيقة في منطقة الطيف الشمسي [14]، [45]. لهذا السبب، بدأ البحث عن تصنيع مواد ليزرية جديدة ذات نطاق عريض لامتصاص طيف الشمس. من أجل تحقيق هذا الهدف، تم استخدام تقنية التطعيم المضاعف عن طريق إضافة أيونات الكروم (Cr^{+3}) أو أيونات السيريوم (Ce^{+3}) لـ Nd:YAG للحصول على مواد مثل Cr:Nd:YAG [5] أو Ce:Nd:YAG [6] على التوالي. تُعتبر هذه الموادّ أوساطاً فعّالة مضخّمة مُحسّنة وذات كفاءة أفضل.

يتّم، في هذا الفصل، تقديم نظرة عامّة على الاشعاع الشمسي و ليزرات الحالة الصلبة مع التركيز على خصائص أهم الأوساط الفعّالة المستعملة في تقنية الليزر الشمسي على غرار Nd:YAG و Ce:Nd:YAG.

2.II الشمس

الشمس تمثل نجم المجموعة الشمسية، وهي أكبر من كواكب المجموعة ككلّ مجتمعة، ويبلغ وزنها حوالي $1.986 \times 10^{30} \text{ Kg}$ ، أمّا قطرها فيبلغ حوالي $1.4 \times 10^6 \text{ Km}$ [46].

تتكوّن الشمس من عنصريّ الهيدروجين والهيليوم بشكل رئيسي. إذ تبلغ نسبة الهيدروجين حوالي 80% والهيليوم 19% أمّا 1% المتبقية فهي عبارة عن عناصر أخرى كالكربون والنيتروجين. يُنتج الهيليوم نتيجة تفاعل الاندماج النوويّ بين ذرات الهيدروجين. تبلغ درجة حرارة مركز الشمس حوالي $20 \times 10^6 \text{ K}$ ، أمّا درجة حرارة الطبقة الخارجية فتبلغ حوالي $6 \times 10^3 \text{ K}$ [46]. ويمكن تشبيه الشمس فيزيائياً بإشعاع الجسم الأسود الذي تنبعث منه موجات الإشعاع الكهرومغناطيسي حاملاً الطاقة الموزّعة طيفياً، أي تسير شدّتها مع طول الموجة [25].

يعطى تدفق هذه الطاقة بقانون ستيفان-بولتزمان [25]:

$$\Phi = \sigma \cdot (T_s)^4 \cdot 4\pi \cdot (R_s)^2 \quad (1-II)$$

حيث:

- R_s : نصف قطر الشمس [m].
- T_s : درجة حرارتها [K].
- σ : ثابت ستيفان-بولتزمان: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$.

3.II الإشعاع الشمسي

تُرسل الشمس أشعتها على شكل فوتونات تنطلق بسرعة الضوء c على شكل موجات مستعرضة حيث لكل فوتون طول موجي (λ) وكمية من الطاقة (E) تتناسب عكسيا مع الطول الموجي حسب نظرية بلانك [25]، كما توضح المعادلة الآتية:

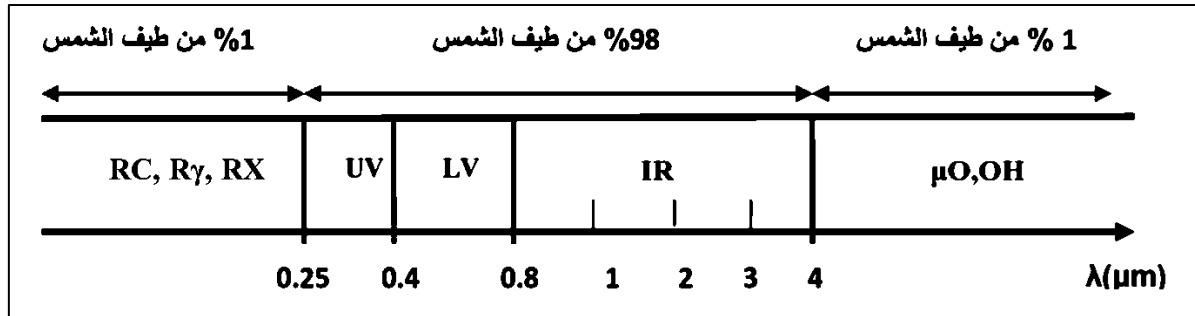
$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (2-II)$$

حيث:

- $\nu = c/\lambda$: هو تردد الموجة [Hz].
- λ : طول الموجة [m].
- $c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$: سرعة الضوء في الفراغ.
- $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ [J.s]}$: ثابت بلانك.

4.II طيف الإشعاع الشمسي

إنّ الإشعاع الشمسي الصّادر عن الشمس بموجات ذات أطوال مختلفة؛ مُجمّلها على شكل أمواج كهرومغناطيسية تتوزّع طاقتها على طيف الإشعاع بنسبة 98% في مجال، بينما نجد 1% من الطاقات تحت هذا المجال و 1% فوق هذا المجال [46]، كما هو مبين في الشكل (1.II).



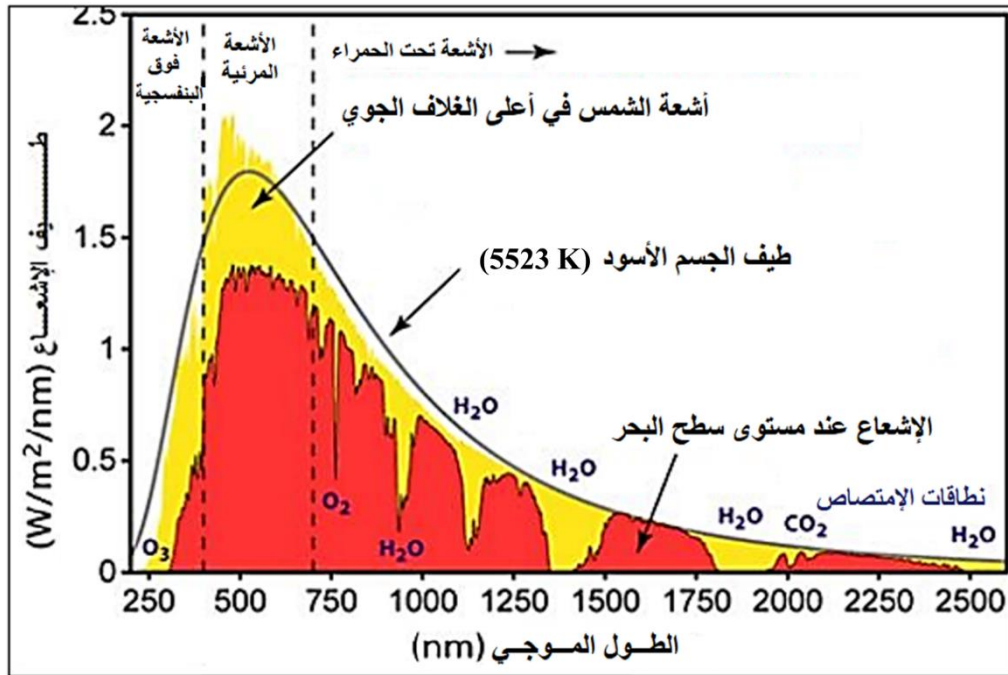
الشكل (1.II): توزيع طيف الإشعاع الشمسي [37].

- $\lambda \in [0.25, 0.4] \mu\text{m}$: المجال فوق بنفسجي (UV) يمثل 7% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.
- $\lambda \in [0.4, 0.8] \mu\text{m}$: المجال المرئي (LV) يمثل 47.5% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.
- $\lambda \in [0.8, 4] \mu\text{m}$: المجال تحت الأحمر (IR) يمثل 45.5% من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

حيث:

- RX : الأشعة السينية؛ $\text{R}\gamma$: الأشعة غاما؛ RC : الأشعة الكونية.
- μO : أشعة الميكروويف؛ OH : أشعة الراديو.

إنّ الإشعاع الشمسي يُحاكي إشعاع الجسم الأسود في درجة الحرارة $T=5600K$ في مجال الطيف، بينما يصل إلى سطح الأرض بعد بعض الإمتصاصات من قبل مختلف الغازات وبخار الماء داخل الغلاف الجوي [46]، كما هو مبين في الشكل (2.II).



الشكل (2.II): محاكاة إشعاع الجسم الأسود لطيف الإشعاع الشمسي [25].

5.II ليزرات الحالة الصلبة المعروفة

يُقصد بليزرات المواد الصلبة عادة تلك التي يكون الوسط الفعّال (active medium) إمّا بلّورة عازلة أو زجاج. إنّ ليزرات الحالة الصلبة غالباً ما تكون فيها الموادّ الفعّالة عبارة عن أيونات شائبة داخل البلورات الأيونية. و الأيون عادة أحد المركّبات من سلسلة العناصر الانتقالية في الجدول الدوري مثل أيونات الفلزّ الانتقالي و من أبرزها Cr^{+3} [4] أو أيونات الأتربة النادرة و من أبرزها: Nd^{+3} ، Ce^{+3} و Ho^{+3} [37].

إنّ الانتقالات التي تحصل في العمل الليزري تشمل حالات تعود إلى الطبقات الداخلية غير الممتلئة. لذلك فإنّ هذه الانتقالات لا تتأثر بقوة بالحقل البلّوري. و هذا بدوره يعني أنّ هذه الانتقالات تكون إلى حدّ بعيد حادة (أي أن مقطع الإصدار المحرّض نوعاً ما كبير) [21]، وتكون الانتقالات غير المشعة ضيقة (أي أن عمر الإثارة نوعاً ما طويل) [36]. و لذا فإنّ حدّ العتبة لمعدل الضّخ لليزر المستويات الأربعة صغير بشكل كاف ممّا يسمح للفعل الليزري بالحدوث.

1.5.II أيونات الأتربة النادرة

تُعتبر أيونات الأتربة النادرة في بلورات معيّنة، مواد ليزرية جيّدة، و هي تملك عدد ذري محصور بين: $Z=57$ (Lanthane) و $Z=71$ (Lutecium)، و يكون التوزيع الإلكتروني في الحالة المتعادلة: $[Xe]4f^n5d^06s^2$ ، n يتغير من: 0 (Lanthane) إلى 14 (Lutecium). الشكل (3.II) يوضح موضع أيونات الأتربة النادرة في الجدول الدوري [47].

عناصر الأتربة النادرة

1																	18						
1 H																	2 He						
3 Li	4 Be																						
11 Na	12 Mg																	13 B	14 C	15 N	16 O	17 F	18 Ne
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo						

Rare Earth Elements	Y	La	Ce
	Sc	Pr	Nd
	Sm	Eu	Gd
	Ho	Er	Tm
		Yb	Lu

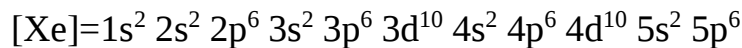
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

الشكل (3.II): موضع أيونات الأتربة النادرة في الجدول الدوري [47].

وتتميز أيونات الأتربة النادرة بالملء التدريجي للطبقة الإلكترونية 4f ، في حين تكون الطبقات الخارجية 6s و 5p و 5s مليئة.

2.5.II التوزيع الإلكتروني لذرات الأتربة النادرة وأيوناتها

يكون موقع عناصر الأتربة النادرة في الجدول الدوري بعد الفترة من العناصر المنتهية بالعنصر الرابع والخمسين، وهو الزينون (Xenon). ففي هذا العنصر، تكون الطبقات التي تمتلك أعدادها الكمية الرئيسية n ، القيم 1 و 2 و 3 مليئة تمامًا، وأما $n=4$ ، فتكون طبقاته الثانوية s و p و d مليئة. بينما تكون الطبقة الثانوية 4f التي بإمكانها إسكان 14 إلكترونًا فارغة تمامًا. وعلى الرغم من هذا، تكون $n=5$ قد اكتسبت إلكتروناتها الثمان الأولى التي تملأ المدارات 5s و 5p. وهكذا، وباستخدام التذليل الرمزي المعتاد، يكون التوزيع الإلكتروني لعنصر الزينون (Xe) مكتوبًا كما يلي [29]:



وتمتلك كل العناصر الواقعة ما بعد الزينون هذا التركيب الإلكتروني، إضافة إلى امتلاكها إلكترونات في المدارات 4f و 5d و 6s. ويمتلك كل من السيزيوم (Cs) و الباريوم (Ba)، وهي العناصر التي تتبع الزينون، إلكترونًا وإلكترونين في المدار الإلكتروني 6s على التوالي. يوضح الجدول (1.II)، التوزيع الإلكتروني لذرات الأتربة النادرة وأيوناتها والمستوى الأساسي الموافق [47]. أما الجدول (2.II)، فيعرض نطاقات الامتصاص والإصدار لبعض أيونات الأتربة النادرة [29], [47].

الجدول (1.II): التوزيع الإلكتروني لذرات الأتربة النادرة وأيوناتها والمستوى الأساسي الموافق [47].

العدد الذري	العنصر	الرمز	التوزيع الإلكتروني للذرات	التوزيع الإلكتروني للأيونات	المستوى الأساسي
57	La Lanthanum (لانثانوم)	La	$[Xe]5d^1 6s^2$	$[Xe]$	1S_0
58	Ce Cerium (السيريوم)	Ce	$[Xe]4f^1 5d^1 6s^2$	$[Xe]4f^1$	$^2F_{5/2}$
59	Pr Praseodymium (براسيوديميوم)	Pr	$[Xe]4f^3 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^2$	3H_4
60	Nd Neodymium (نيوديميوم)	Nd	$[Xe]4f^4 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^3$	$^4I_{9/2}$
61	Pm Promethium (بروميثيوم)	Pm	$[Xe]4f^5 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^4$	5I_4
62	Sm Samarium (ساماريوم)	Sm	$[Xe]4f^6 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^5$	$^6H_{5/2}$
63	Eu Europium (يوروبيوم)	Eu	$[Xe]4f^7 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^6$	7F_0
64	Gd Gadolinium (غادولينيوم)	Gd	$[Xe]4f^7 5d^1 6s^2$	$[Xe]4f^7$	$^8S_{7/2}$
65	Tb Terbium (تربيوم)	Tb	$[Xe]4f^9 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^8$	7F_6
66	Dy Dysprosium (ديسبروسيوم)	Dy	$[Xe]4f^{10} 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^9$	$^6H_{15/2}$
67	Ho Holmium (هولميوم)	Ho	$[Xe]4f^{11} 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^{10}$	5I_8
68	Er Erbium (إربيوم)	Er	$[Xe]4f^{12} 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^{11}$	$^4I_{15/2}$
69	Tm Thulium (ثوليوم)	Tm	$[Xe]4f^{13} 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^{12}$	3H_6
70	Yb Ytterbium (إتيريبيوم)	Yb	$[Xe]4f^{14} 5d^0 6s^2$	$[Xe]4f^{13}$	$^2F_{7/2}$
71	Lu Lutetium (لوتيشيوم)	Lu	$[Xe]4f^{14} 5d^1 6s^2$	$[Xe]4f^{14}$	1S_0

$[Xe]=1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6$

الجدول (2.II): نطاقات الامتصاص والإصدار لبعض أيونات الأتربة النادرة [29], [47].

الرمز	العنصر	$\lambda_{em}(nm)$	$\lambda_{ab}(nm)$
Pr	Praseodymium (براسيوديميوم)	1300	1010
Nd	Neodymium (نيوديميوم)	1060	790
Sm	Samarium (ساماريوم)	1293	488
Dy	Dysprosium (ديسبروسيوم)	1300	900-800
Er	Erbium (إربيوم)	1550	800
Yb	Ytterbium (إتيريبيوم)	1000	980-900
Nd:YAG		1060	808
Nd:YVO4		1342-1060	808
Nd/Cr:YAG Ceramic		1064	600-440
Ce:Nd:YAG		1064	460, 339, 531

3.5.II اختيار المواد المضيفة مع أيونات الأتربة النادرة

ينبغي للبنية الإلكترونية مع الأيونات الفعالة منح مستويات مناسبة في مجال الطاقة. كما ينبغي للمادة المضيفة منح ظروف مناسبة، خصائص ديناميكية و حرارية جيدة، ونظام طاقة مرتفع وكفاءة تبديد للحرارة. لذلك يجب أن تملك:

1. عتبة ضخ منخفضة.
2. موصلية حرارية عالية لتبديد كفاءة الحرارة المتولدة في مادة الليزر.
3. خصائص حرارية و ميكانيكية عالية للصمود في وجه النبضات ذات الطاقة العالية.
4. عمر إثارة طويل.
5. مقطع إصدار ليزري كبير.

4.5.II ليزرات النيوديميوم (Neodymium Lasers)

تُعدّ ليزرات النيوديميوم من أكثر الليزرات الصلبة شيوعاً ويتكوّن وسط الليزر إمّا من بلّورة ($Y_3Al_5O_{12}$) وعادةً يُطلق عليها ياغ؛ YAG، وهي الأحرف الأولى لـ (Yttrium Aluminum Garnet) الذي فيه قسم من أيونات Y^{+3} ، حُلّت محلّها أيّونات Nd^{+3} ، أو أبسط من ذلك الزجاج المُطعّم بأيّونات $(Nd:Glass) Nd^{+3}$.

1.4.5.II المادّة المُضيفّة: عقيق الإيتريوم والألمنيوم (YAG)

عقيق الإيتريوم والألمنيوم ($YAG, Y_3Al_5O_{12}$)، هو مادّة بلوريّة اصطناعيّة من مجموعة العقيق. وهو عبارة عن طور أو أكسيد الإيتريوم والألمنيوم المُكعّب، مع أمثلة أخرى مثل: ($YAlO_3, YAP [48]$) في شكل سداسي أو مُتعامد، شبيه بالبيروفسكايت، و أحادي الميل ($Y_4Al_2O_9, YAM [50]$) [49].

يتم استخدام YAG (كما يُظهر الشكل (4.II)) في المجوهرات كمحاكاة للألماس والأحجار الكريمة الأخرى. المُتغيّرات الملونة و عناصر التّطعيم المرافقة تشمل [51]: الأخضر (الكروم)، والأزرق (الكوبالت)، والأحمر (المنغنيز)، والأصفر (النتانايوم)، والأزرق / الوردي / الأرجواني (النيوديميوم، اعتماداً على مصدر الضوء)، والوردي، والبرتقالي. نظراً لكونها أحجاراً ذات أوجه، يتم تقييمها (كمواد تركيبية: synthetics) نظراً لوضوحها وقوّة تحملها ومعامل انكسارها العالي وتشتتها. الزاوية الحرجة لـ YAG هي 33 درجة. YAG لديه حساسيّة منخفضة للحرارة [52].



الشكل (4.II): صورة لبلّورة عقيق الإيتريوم والألمنيوم ($YAG, Y_3Al_5O_{12}$) [51].

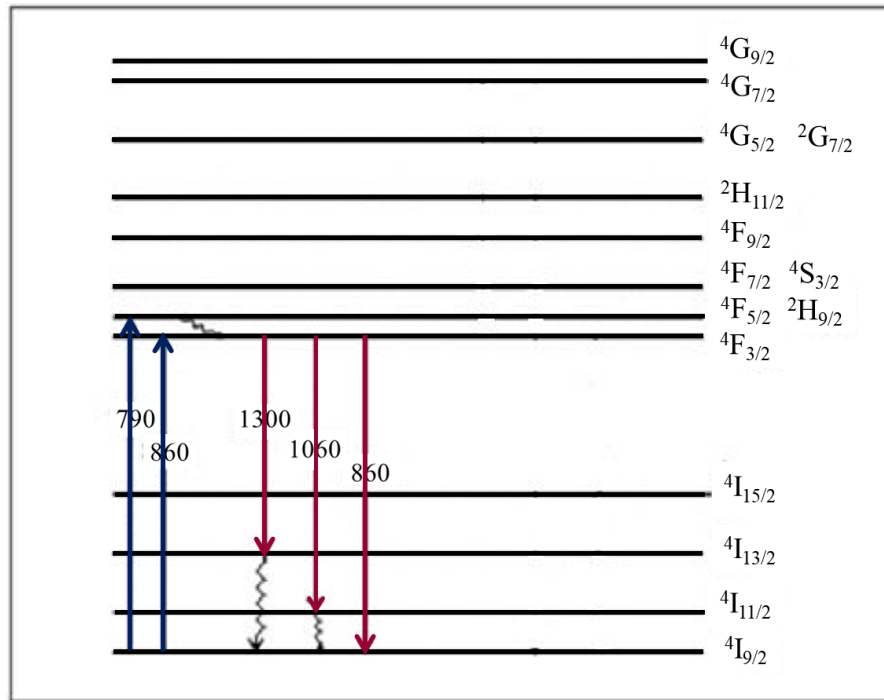
نظراً لشفافيّته الضوئيّة الواسعة [53]، الضّغط الدّاخلي المنخفض، وصلابته العالية، ومقاومته للموادّ الكيميائيّة والحرارة، يتم استخدام YAG في مجموعة متنوعة من البصريّات [54]. إنّ افتقاره إلى الانكسار (على عكس الياقوت) يجعله مادة مثيرة للاهتمام لأنظمة الليزر عالية الطاقة/عالية الاستطاعة. تتراوح مستويات تآلف الليزر لـ YAG من 1.1 إلى $2.2KJ/cm^2$ (10ns, 1064nm) [55].

ياغ (YAG)، مثل العقيق والياقوت، ليس له استخدامات كوسيط ليزر عندما يكون نقيّاً. ومع ذلك، بعد التّطعيم بأيّون مناسب، يُستخدم YAG بشكل شائع كمادّة مُضيفّة في العديد من ليزرات الحالة الصلبة. يمكن تطعيم العناصر الأرضيّة النّادرة مثل: النيوديميوم (Nd) والإربيوم (Er) في YAG كأيّونات ليزر نشطة، مما ينتج عنه ليزر Nd:YAG و Er:YAG، على التوالي. يُستخدم YAG المُطعّم بالسيريوم (Ce:YAG) كفسفور في أنابيب أشعّة الكاثود والصّمّامات الثنائيّة الباعثة للضوء، وكُمومض [25].

2.4.5.II النيوديميوم (Nd)

يُعتبر عنصر النيوديميوم (Nd) من أبرز عناصر الأتربة النادرة، وهو من أكثر المواد المعروفة استعمالاً في الليزرات الصلبة، حيث له القابلية على إنتاج أشعة ذات قدرة عالية في المنطقة تحت الحمراء وفي مناطق مختلفة من الطول الموجي.

يضخ النيوديميوم عند الطول الموجي 790nm تقريباً، ويصدر منه عدة أطوال موجية منها الأساسية: 1300nm، 1060nm، 860nm، 790nm. مخطط الطاقة مبين في الشكل (5.II).



الشكل (5.II): مستويات الطاقة و الانتقالات الالكترونية للنيوديميوم [56].

- إنّ نطاق الضخ الرئيسي يكونان بين المستويات $4I_{9/2}$ ، $4F_{5/2}$ ، $4H_{9/2}$ عند الأطوال الموجية 790nm و 860nm [57].
 - المستوى $4I_{9/2}$ هو المستوى الأساسي.
 - مدة حياة المستويات $4H_{9/2}$ و $4F_{5/2}$ قصيرة جداً [57]، لذلك يحدث استرخاء للأيونات بسرعة نحو المستوى $4F_{3/2}$ بانتقال غير مشع.
- الانتقالات المشعة الممكنة لهذا المستوى:

- عند الطول الموجي $1.3\mu m$: $4F_{3/2} \rightarrow 2I_{13/2}$
- عند الطول الموجي $1.06\mu m$: $4F_{3/2} \rightarrow 2I_{11/2}$
- عند الطول الموجي $0.86\mu m$: $4F_{3/2} \rightarrow 2I_{9/2}$

3.4.5.II عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم (Nd:YAG)

النيوديميوم-ياغ (Nd:YAG) أو عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم ($Nd:Y_3Al_5O_{12}$)، هو عبارة عن بلورة تُستخدم كوسط ليزري لليزر الحالة الصلبة. عادةً ما يُستبدل جزء صغير (1%) من أيونات الإيتريوم Y^{+3} في التركيب البلوري المُضيف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم (YAG) بالنيوديميوم المتأين ثلاثياً

(Nd⁺³) نظرًا لأنّ الأيونات فيهما بنفس الحجم [58]. أيون النيوديميوم هو الذي يوفر نشاط الليزر في البلورة، بنفس طريقة أيون الكروم الأحمر في ليزر الياقوت [58]. تم عرض عملية الليزر Nd:YAG لأول مرة من طرف Geusic و زملائه في Bell Laboratories عام 1964 [59].

تختلف الموصلية الحرارية (النفاذية الحرارية) لـ Nd:YAG باختلاف درجة الحرارة كما هو موضح في الجدول (3.II). أما الجدول (4.II)، فيلخص بعض الخصائص الفيزيائية و البصرية المهمة لـ Nd:YAG.

الجدول (3.II): الخصائص الحرارية لـ Nd:YAG [47].

Property	Units	300K	200K	100K
Thermal conductivity (الموصلية الحرارية)	W cm ⁻¹ K ⁻¹	0.14	0.21	0.58
Specific heat (الحرارة النوعية)	W s g ⁻¹ K ⁻¹	0.59	0.43	0.13
Thermal diffusivity (انتشارية حرارية)	cm ² s ⁻¹	0.046	0.10	0.92
Thermal expansion (التمدد الحراري)	K ⁻¹ × 10 ⁻⁶	7.5	5.8	4.25
$\partial n / \partial T$	K ⁻¹	7.3 × 10 ⁻⁶	—	—

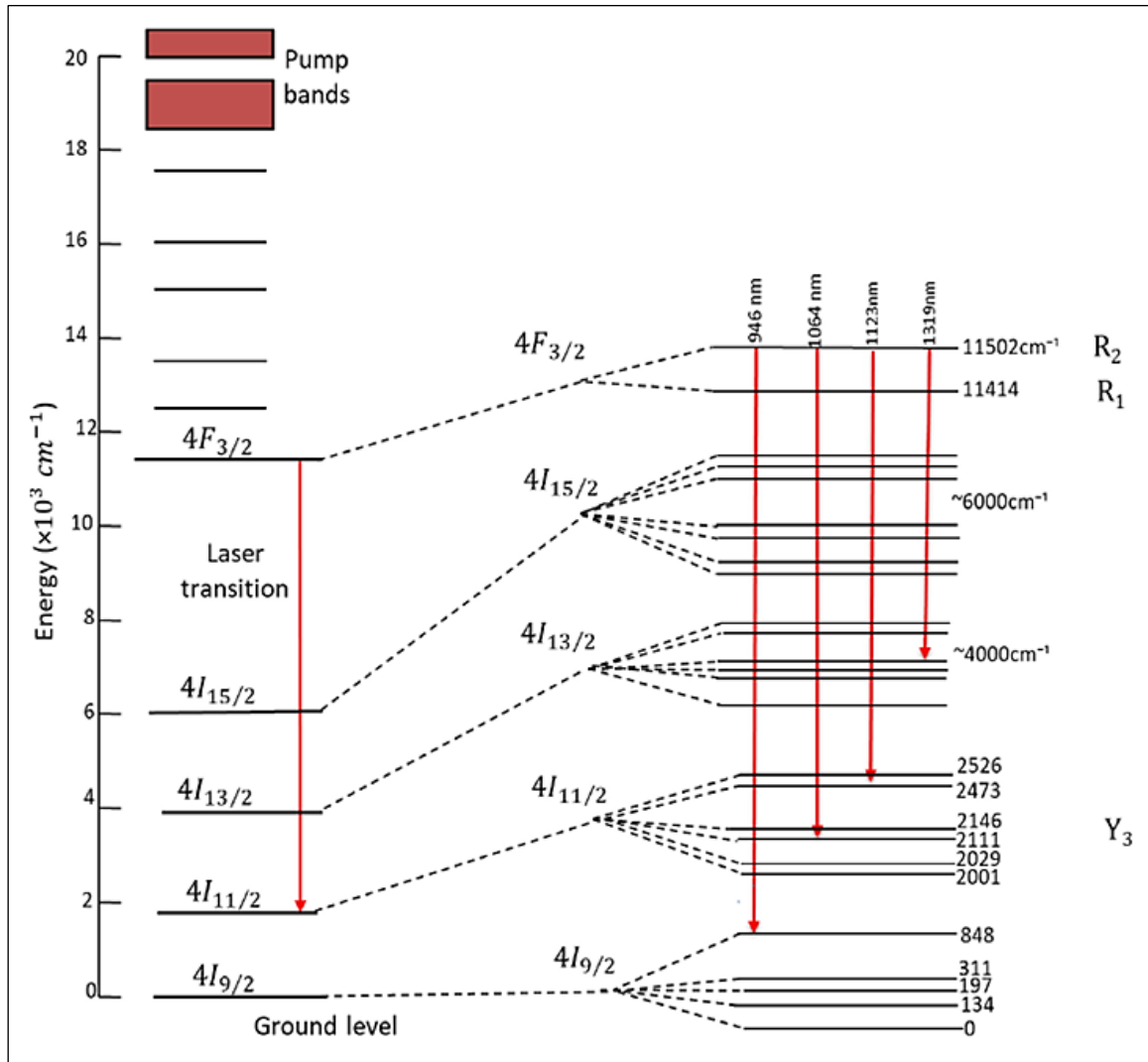
الجدول (4.II): أهم الخصائص البصرية و الفيزيائية لـ Nd:YAG [60].

Chemical formula	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂
Weight % Nd (النسبة المئوية لوزن النيوديميوم)	0.725
Atomic % Nd (النسبة المئوية الذرية للنيوديميوم)	1.0
Melting point (درجة الانصهار)	1970°C
Density (الكثافة)	4.56 g/cm ³
Mohs hardness (صلابة موس)	8 to 8.5
Index of refraction (قريبة الانكسار)	1.82 (at 1064nm)
Modulus of elasticity (معامل المرونة)	3 × 10 ³ kg/cm ³
Photon energy (طاقة الفوتون) at 1060 nm	1.8610
Nd atoms/cm ³ (ذرات النيوديميوم/سم ³)	1.83 × 10 ²⁰
Fluorescence lifetime (عمر الإشتعاع أو الفلورة)	230 μs
Line width (عرض الشعاع الطيفي)	120 GHz
Rupture stress (إجهاد التمزق)	1.3 - 2.6 × 10 ³ kg/cm ³
Tensile strength (مقاومة الشد)	200 MPa
Poisson ratio (نسبة بواسون)	0.3
Scatter losses (الضياع الناتج عن التشتت)	0.002 cm ⁻¹
Stimulated emission cross section (مساحة مقطع الانبعاث المحفز)	
R ₂ - Y ₃	σ ₂₁ = 6.5 × 10 ⁻¹⁹ cm ²
⁴ F _{3/2} - ⁴ I _{11/2}	σ ₂₁ = 2.6 × 10 ⁻¹⁹ cm ²
Thermal expansion coefficient (معامل التمدد الحراري)	
[100] orientation (توجيه), [61]	8.2 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 0-250 °C
[110] orientation (توجيه), [62]	7.7 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 10-250 °C
[111] orientation (توجيه), [63]	7.8 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 0-250 °C
Thermal conductivity (الموصلية الحرارية)	14 W/m.K
Fracture strength (مقاومة الكسر)	180-210 N/mm ²

4.4.5.II ليزر Nd:YAG

ليزر Nd:YAG هو الشكل المختصر المستخدم في عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بالنيوديميوم. وهو ليزر حالة صلبة ذو أربع (04) مستويات لأنه يتكوّن من أربع (04) مستويات طاقة. يعمل هذا الليزر عندما يتم توفير الضخ الضوئي للجهاز. حينها تصعد أيونات Nd إلى مستويات طاقة أعلى وينتج عن انتقالها شعاع ليزر. يُبثّ هذا الليزر عادةً ضوءًا بطول موجي يُقارب 1064nm.

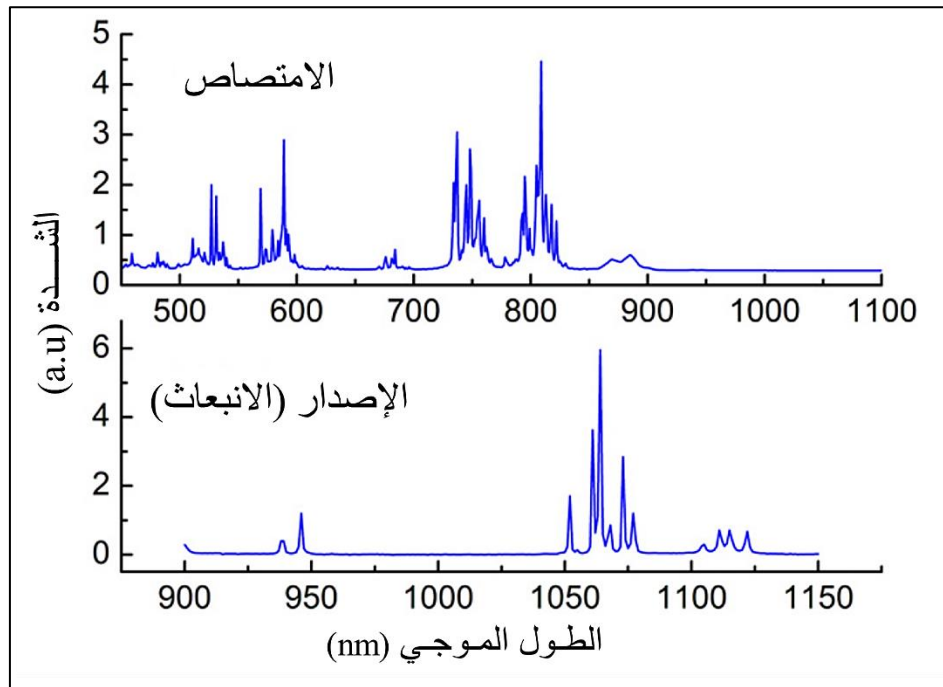
يُوضح الشكل (6.II) مخطط الطاقة ذو أربع مستويات لمادة ليزر Nd:YAG. ليزر الحالة الصلبة Nd:YAG عبارة عن نظام رباعي المستويات باستثناء عند الطول الموجي 946nm. تتمثل ميزة نظام الليزر رباعي المستويات في أنّ الانقلاب السكاني يتم تحقيقه بسهولة أكبر من حالة الأنظمة ثلاثية المستويات. المستوى الأدنى لنظام من أربع مستويات أعلى بكثير من الحالة الأرضية (ground state) ويتم إخلاءه بسرعة من خلال التحوّلات متعدّدة الفوتونات. نتيجة لذلك، يمكن تجنّب إعادة الامتصاص، ويمكن الوصول إلى قدرة المضخة ذات العتبة المنخفضة، ممّا يجعل من السهل الحصول على الانبعاث المحفّز. أطوال موجات الانبعاث لليزر Nd:YAG هي: 946nm، 1064nm، 1123nm و 1319nm [60].



الشكل (6.II): مخطط مستوى الطاقة لمادة ليزر Nd:YAG [60].

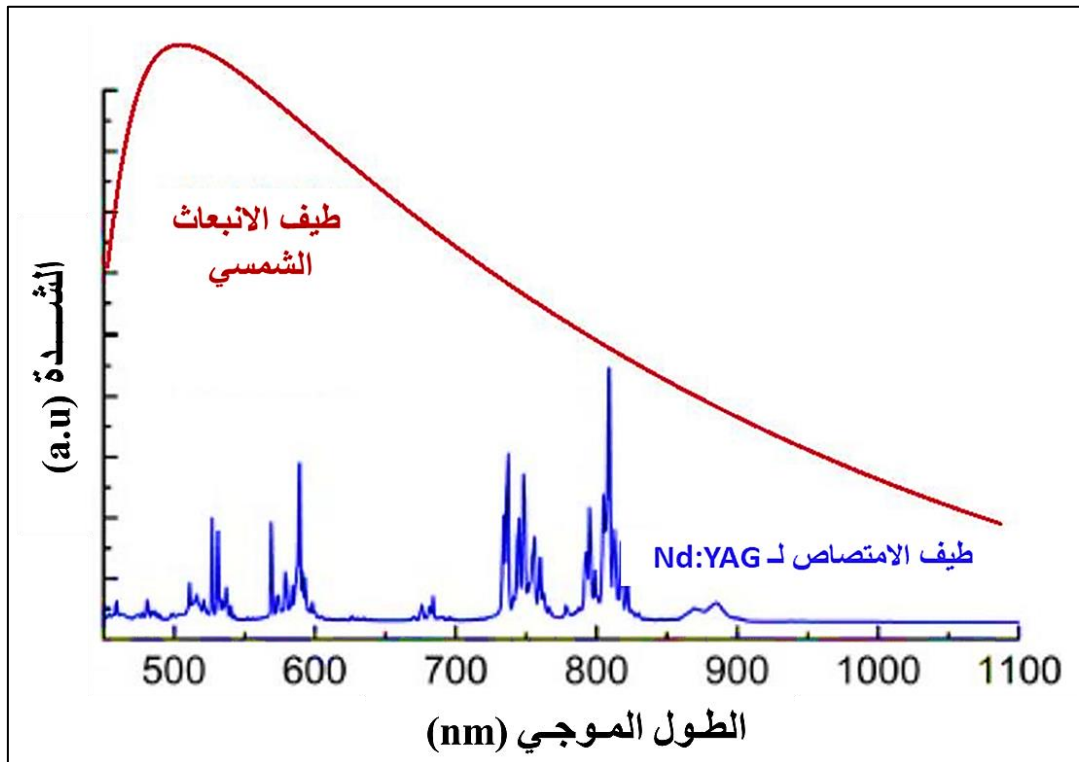
ومع ذلك، يتم تحقيق أعلى كسب عند الطول الموجي 1064nm. عند 946nm، يعمل ليزر Nd:YAG كنظام شبه ثلاثي المستويات يتطلب كثافة ضخ أعلى من الأنظمة ذات أربع مستويات. عند الطول الموجي 1123nm، يُعدّ الحصول على عملية الليزر أمراً صعباً للغاية بسبب الانتقال الضعيف.

يحتوي طيف امتصاص بلورة النيوديميوم-ياغ (Nd:YAG) 22 قيمة امتصاص، أهمّها عند الطول الموجي 808nm، كما يُوضح الشكل (7.II).



الشكل (7.11): طيف الامتصاص و الإصدار (الانبعاث) لـ Nd:YAG [25].

رُغم التداخل الصّغير نسبياً بين طيف الامتصاص لـ Nd:YAG وطيف الانبعاث الشمسي [58]، لكنّ Nd:YAG يبقى من أفضل الأوساط الفعّالة التي تتحمّل الضّخّ عالي الكثافة بواسطة ضوء الشمس المُركّز نظراً لتوصيله الحراري الممتاز، كفاءته الكمية العالية و مقاومته للكسر [39]. الشكل (8.11) يُظهر تداخل طيف الإشعاع الشمسي مع طيف امتصاص Nd:YAG [64] حيث تبلغ نسبة التداخل حوالي 16% [4].



الشكل (8.11): طيف الإشعاع الشمسي مع طيف امتصاص Nd:YAG [64].

يُمكن تلخيص أهم مميزات ليزر Nd:YAG فيما يلي:

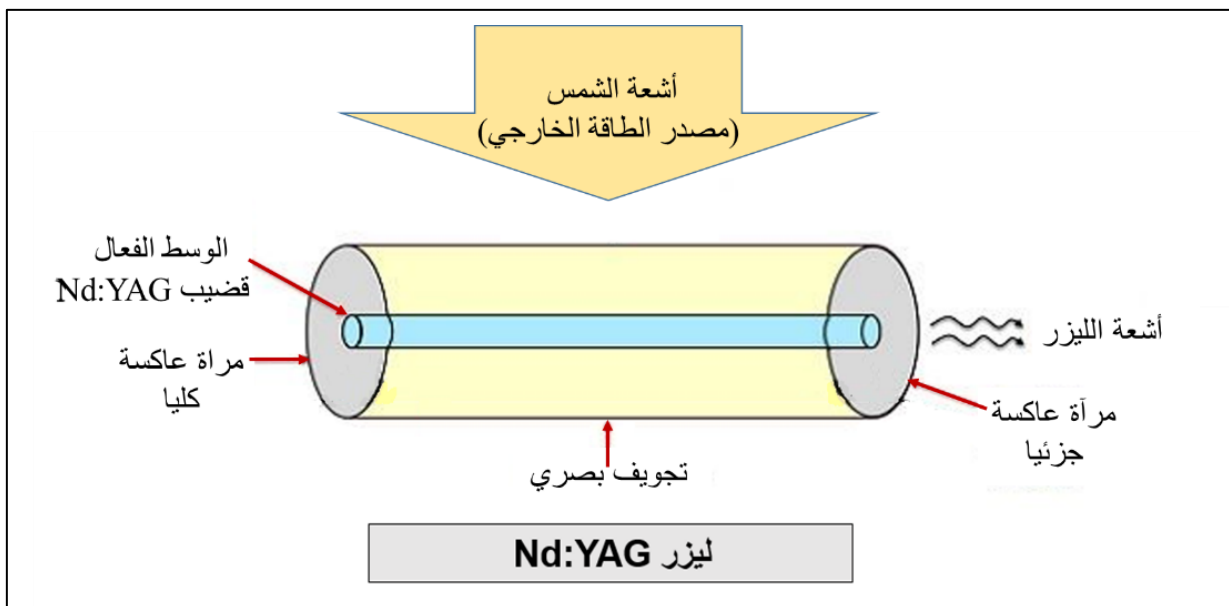
- يملك خصائص بصرية وحرارية وميكانيكية جيدة.
- الإصدار الليزري يكون عند $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$.
- موصليّة حراريّة عالية نسبياً.
- بنية مستقرّة.
- عتبة ضخ منخفضة نسبياً.
- أسعار معقولة وأقل تكلفة.

إنّ ليزرات Nd:YAG يمكنها أن تعمل بنظام الموجة المستمرة (cw: continuous wave) أو بالنظام النبضي (pulsed)، وفي كلتا الحالتين تُستخدم مصابيح خطيّة. تُستعمل مصابيح الزينون (Xe) ذات الضّغط المعتدل (0.5–2 ضغط جوي) و مصابيح الكريبتون (Kr) ذات الضّغط العالي (4–6 ضغط جوي) للتشغيل النبضي و المستمر على التوالي [39].

تُستعمل ليزرات Nd:YAG على نطاق واسع في مجموعة متنوعة من التّطبيقات منها معالجة الموادّ أثناء الصّنع، وفي تعيين المدى و في الجراحة الطّبية [21].

5.4.5.2 إنشاء ليزر Nd:YAG

يتم تصنيف ليزر Nd:YAG أساساً إلى 3 عناصر هي: الوسط الفعّال ومصدر الضّخ والمرنان البصري. يُوضح الشكل (9.II) هيكل منظومة الليزر الشمسي Nd:YAG.



الشكل (9.II): هيكل منظومة الليزر الشمسي Nd:YAG.

- **الوسط الفعّال:** يُعرف أيضاً باسم وسط الليزر وهو الجزء الأوسط من الهيكل، أي بلّورة Nd:YAG. بشكل أساسي، عندما يتم توفير مصدر الطاقة الخارجي، تنتقل الإلكترونات من حالة الطاقة المنخفضة إلى حالة طاقة أعلى، ممّا يؤدي إلى حدوث الليزر.
- **مصدر الطاقة الخارجي:** بسبب الاختلاف في مستويات الطاقة، تحتاج الإلكترونات إلى بعض الضّخ الخارجي من أجل إجراء انتقال من حالة إلى أخرى. لذلك، كي تتم عملية الليزر، يلزم وجود مصدر خارجي للضخ. في حالة الليزر الشمسي، فإن أشعة الشّمس هي مصدر الطّاقة الخارجي.

▪ **مرنان بصري:** يتم طلاء طرفي قضيب Nd:YAG بالفضة. ومع ذلك، فإن أحد الأطراف مطلّي بالكامل بالفضة لتحقيق أقصى انعكاس للضوء بينما يتم تغليف الطرف الآخر جزئياً من أجل توفير مسار لاشعاع الضوء من مصدر خارجي للوصول إلى الوسط الفعّال. وبذلك يتم تشكيل تجويف بصري.

5.5.II التّطعيم المُضاعف لـ YAG بـ Nd^{+3} و: Cr^{+3} أو Ce^{+3}

مقارنةً مع الموادّ الأخرى، فإنّ Nd:YAG هي أفضل مادة تُستعمل تحت إشعاع شمسي عالي التركيز بسبب كفاءتها الكميّة العالية والتوصيل الحراري الجيّد. لكنّها لا تزال تعاني من كفاءة منخفضة في استخدام ضوء الشمس كمصدر لإنتاج الليزر، ولديها نطاقات إمتصاص ضيقة في منطقة الطيف الشمسي [58].

وفقاً لدراسة Zhao Bin [4] و زملائه، تتداخل نطاقات امتصاص الأيونات (Nd^{+3}) بحوالي 16% مع الطيف الشمسي. يمكن تحسين إنتاج الليزر الشمسي عن طريق إضافة عناصر مثل أيونات الكروم (Cr^{+3}) أو أيونات السيريوم (Ce^{+3})، والتي لها نطاقات امتصاص أوسع في المنطقة المرئية، مما يزيد من كفاءة تحويل الطاقة [65]. على الرغم من أن كلاً من أيونات Cr^{+3} و Ce^{+3} لها نطاقات انبعاث مختلفة عن تلك الخاصّة بأيون Nd^{+3} ، إلّا أنّها تتداخل تماماً مع بعض نطاقات الامتصاص لـ Nd^{+3} .

فمن أجل زيادة الإمتصاص والاستغلال الأفضل لطيف الشمس، ظهرت فكرة التّطعيم المُضاعف لـ YAG بأيونات الكروم (Cr^{+3}) [5] أو أيونات السيريوم (Ce^{+3}) [6] إضافة لأيونات النيوديميوم (Nd^{+3}). وهذا للاستفادة من النطاق العريض لطيف الامتصاص لـ (Cr^{+3}) أو (Ce^{+3}) في منطقة الطيف المرئي، والنتيجة هي الحصول على أوساط فعّالة ($Cr:Nd:YAG$ [5] أو $Ce:Nd:YAG$ [6]) ذات كفاءة أفضل. ندرس في الأجزاء الموالية الوسط الفعّال المُحسن $Ce:Nd:YAG$ و أهم مميّزاته مقارنةً بـ $Nd:YAG$.

6.5.II عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التّطعيم المُضاعف بالنيوديميوم والسيريوم ($Ce:Nd:YAG$)

النيوديميوم-السيريوم ياغ مُضاعف التّطعيم أو عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التّطعيم المُضاعف بالنيوديميوم و السيريوم ($Ce:Nd:YAG$ أو $Ce,Nd:YAG$) هو عبارة عن مادة وسط فعّال لليزر تشبه إلى حدّ بعيد $Nd:YAG$. ذرات السيريوم المُضافة تملك امتصاص قوي في منطقة الأشعة فوق البنفسجية وتنقل طاقتها إلى ذرات النيوديميوم، مما يزيد من كفاءة الضّخ؛ والنتيجة هي حمل حراري أقلّ وإنتاج طاقة أعلى من $Nd:YAG$ عند نفس مستوى الضّخ. الطول الموجي لهذا الليزر، 1064nm، هو نفسه بالنسبة لـ $Nd:YAG$. تتمتع هذه المادة بمقاومة جيّدة للضرر الذي تسببه الأشعة فوق البنفسجية من مصدر الضّخ، وعتبة منخفضة لليزر. عادةً ما يتم استبدال 1.1-1.4% من ذرات YAG بـ Nd ، و 0.05-0.1% Ce [58].

يُوضّح الجدول (5.II) أهمّ الخصائص الكيميائيّة، الفيزيائيّة و الليزرية لـ $Ce:Nd:YAG$ [66]. نُلخّص أهم مميّزات بلّورة $Ce:Nd:YAG$ فيما يلي [25], [66]:

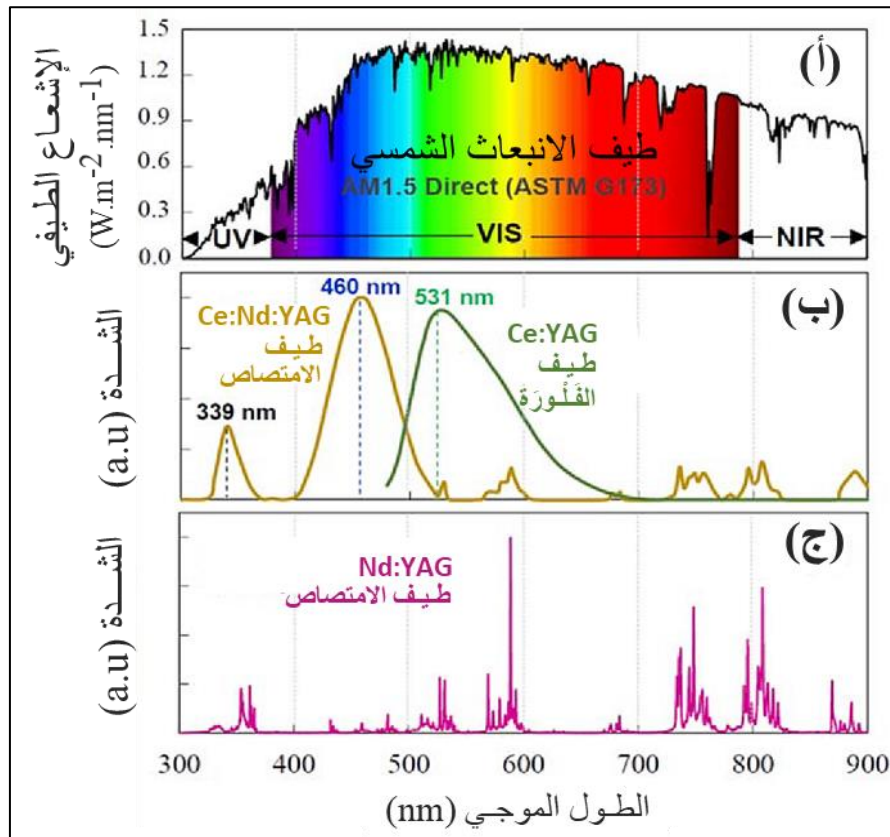
- عتبة منخفض.
- كفاءة عالية.
- استقرار حراري جيّد.
- جودة بصريّة عالية.
- إمتصاص جيّد في منطقة الأشعة فوق البنفسجية.

الجدول (5.II): أهم الخصائص الكيميائية، الفيزيائية و الليزرية لـ Ce:Nd:YAG [66].

Chemical formula	Ce ³⁺ :Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂
Dopant concentration (تركيز عناصر التطعيم)	Nd: 1.1 - 1.4 atm % Ce 0.05 - 0.1 atm %
Crystal structure (البنية البلورية)	Cubic (بنية مكعبة الشكل)
Lattice parameters (ثابت الشبكة البلورية)	12.01 Å
Melting point (درجة الانصهار)	1970 °C
Mohs hardness (صلابة موس)	8.5
Density (الكثافة)	4.56 ± 0.04 g/cm ³
Specific heat (0-20) (الحرارة النوعية)	0.59 J/g.cm ³
Modulus of elasticity (معامل المرونة)	310 GPa
Young's modulus (معامل المرونة الطولي لـ يونغ)	3.17×10 ⁴ Kg/mm ²
Poisson ratio (نسبة بواسون)	0.3(est.)
Tensile strength (مقاومة الشد)	0.13~0.26 GPa
Thermal expansion coefficient (معامل التمدد الحراري)	[100] Direction: 8.2 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ [110] Direction: 7.7 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ [111] Direction: 7.8 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Thermal conductivity (الموصلية الحرارية)	14 W m ⁻¹ K ⁻¹ (@25 °C)
Thermal optical coefficient (∂n/∂T)	7.3×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Thermal shock resistance (مقاومة الصدمات الحرارية)	790 W/m
Laser transition (انتقال الليزر)	⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{11/2}
Laser wavelength (الطول الموجي للليزر)	1.064μm
Photon energy (طاقة الفوتون)	1.86×10 ⁻¹⁹ J@1.064μm
Emission linewidth (عرض الشعاع الطيفي)	4.5Å @1.064μm
Emission cross section (مساحة مقطع الانبعاث)	2.7~8.8×10 ⁻¹⁹ cm ⁻²
Fluorescence lifetime (عمر الإشتعاع أو الفلورة)	230 μs
Index of refraction (قريبة الانكسار)	1.8197@1064nm

7.5.II الأطياف الضوئية ونقل الطاقة من أيونات Ce³⁺ إلى Nd³⁺ في وسط Ce:Nd:YAG

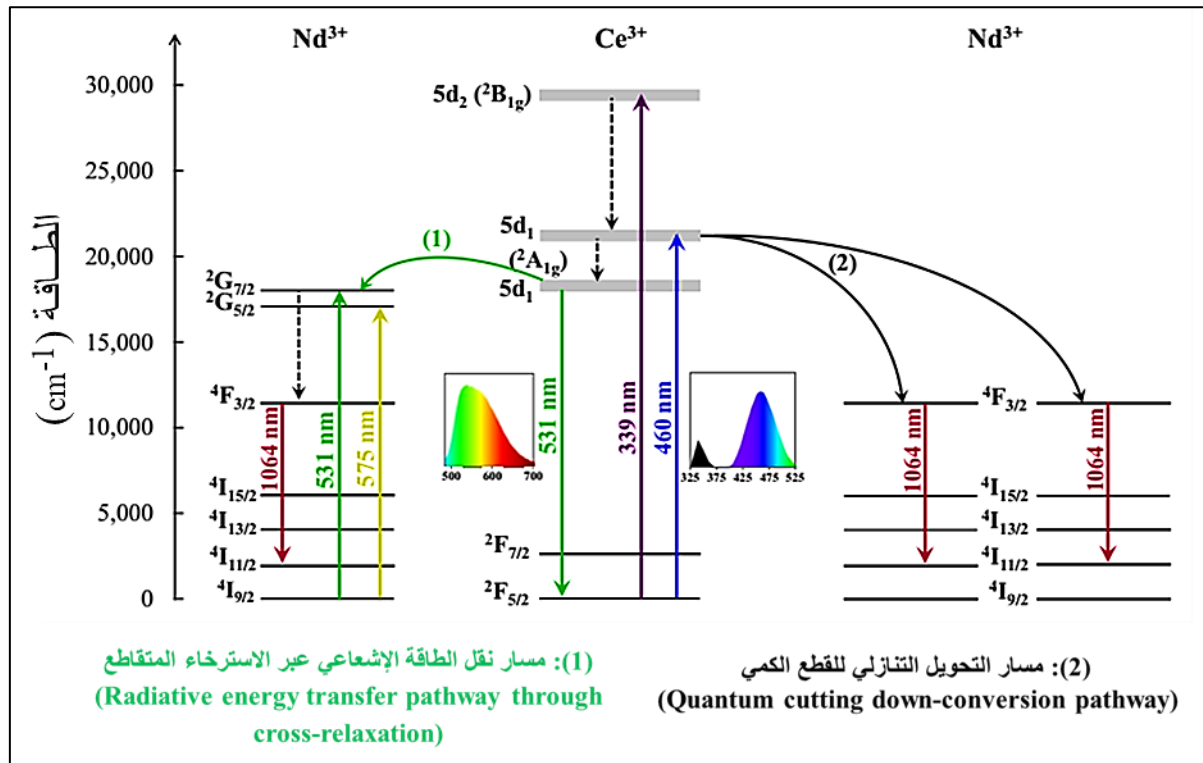
لقد أظهر الوسط الفعال Ce:Nd:YAG بالفعل إمكانية زيادة كفاءة أشعة الليزر ذات نطاق الامتصاص العريض، مقارنةً ببلورة Nd:YAG [67-71] نظرًا لخاصية امتصاصه القوي في منطقة الأشعة فوق البنفسجية (UV) و منطقة الطيف المرئي عند ضخ الضوء ذي النطاق العريض و كذلك لخاصية النقل الفعال للطاقة من Ce³⁺ إلى Nd³⁺. في الشكل (10.II)، تم تمثيل طيف الإشعاع الشمسي، أطياف الامتصاص لـ Nd:YAG و Ce:Nd:YAG، و طيف الفلورة لـ Ce:YAG. يحتوي طيف الامتصاص لـ Ce:Nd:YAG على نطاقين امتصاص عريضين يتمركزان عند 339nm و 460nm، والتي هي السمة المميزة لأيون Ce³⁺ في شبكة YAG و غيرها من النطاقات المميزة لأيونات Nd³⁺. يتميز طيف الفلورة لـ Ce:YAG بتألق أخضر قوي وواسع يتمركز حول 531nm ويتداخل جيدًا مع قمتي امتصاص لأيون Nd³⁺ حول 530nm و 589nm.



الشكل (10.II): (أ) طيف الانبعاث الشمسي المباشر بمدى طول موجي 300-900nm [71]؛ الأشعة فوق البنفسجية (UV)؛ الضوء المرئي (VIS)؛ بالقرب من الأشعة تحت الحمراء (NIR)؛ (ب) طيف امتصاص Ce:Nd:YAG [73] وطيف الفلورة Ce:YAG [72]؛ (ج) طيف الامتصاص Nd:YAG [25].

تم فحص آليات نقل الطاقة في مادة Ce:Nd:YAG في العديد من الدراسات [11], [68], [69], [72]. تم إثبات انتقال الطاقة الإشعاعية بين أيونات Ce^{3+} و Nd^{3+} مسبقاً من خلال تداخل نطاقي الانبعاث والامتصاص بين الأيونات [11], [68], [69], [72]. أظهر Tai وزملائه في دراستهم إمكانية أخرى لآلية نقل الطاقة عن طريق القطع الكمي (quantum cutting) للأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) الذي يتضمن التحويل التنازلي (down-conversion) للفوتون المرئي الممتص إلى انبعاث فوتونين إثنين من الأشعة تحت الحمراء [72].

الشكل (11.II): يوضح آليات نقل الطاقة بين أيونات Ce^{3+} و Nd^{3+} في مخطط مستوى الطاقة. عندما يتم امتصاص فوتونات المضخة بأطوال موجية حوالي 339nm و 460nm، تتحفز أيونات Ce^{3+} من الحالة الأرضية $^2F_{5/2}$ إلى نطاقي المضخة العريضين $5d_1$ و $5d_2$ ، على التوالي. يمكن للإلكترونات الموجودة في نطاق المضخة $5d_2(^2B_{1g})$ أن تسترخي بشكل غير إشعاعي إلى نطاق المضخة السفلي $5d_1(^2A_{1g})$ ثم تتحلل بشكل إشعاعي إلى الحالة الأرضية $^2F_{5/2}$. تحدث آلية النقل الإشعاعي بين الانتقال $5d_1(^2A_{1g}) \rightarrow ^2F_{5/2}$ لأيون Ce^{3+} و الانتقال $^4I_{9/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$ لأيون Nd^{3+} ، بسبب التداخل القوي بين نطاق الانبعاث Ce^{3+} وخط الامتصاص Nd^{3+} ، كما هو مبين في الشكلين (10.II) و (11.II)، يُشار إليه بال مسار (1) من خلال عملية الاسترخاء المتبادل [11], [68], [69], [72]. آلية نقل الطاقة الأخرى القائمة على التحويل التنازلي التعاوني (cooperative down-conversion) ممكنة لأن طاقة الانتقال $5d_1(^2A_{1g}) \rightarrow ^2F_{5/2}$ لأيون Ce^{3+} هي تقريباً ضعف فرق الطاقة بين المستويين $^4F_{3/2}$ و $^4I_{11/2}$ لأيون Nd^{3+} (الشكل (11.II))، كما هو موضح بالمسار (2) [72], [74], [75].



الشكل (11.II): رسم تخطيطي لمستوى الطاقة يوضح آليات نقل الطاقة بين أيونات Ce³⁺ و Nd³⁺ في الوسط الفعال [72] Ce:Nd:YAG. (1) مسار نقل الطاقة الإشعاعي. (2) مسار التحويل التنازلي للقطع الكمي.

إنّ التداخل الجيد بين نطاقات الامتصاص Ce³⁺ والطيف الشمسي (الشكل (10.II)) بالإضافة إلى النقل الفعال للطاقة بين أيونات Ce³⁺ و Nd³⁺ (الشكل (11.II)) عبر المسارين:

1. مسار نقل الطاقة الإشعاعي عبر الاسترخاء المتقاطع (Radiative energy transfer pathway through cross-relaxation)

2. مسار التحويل التنازلي للقطع الكمي (Quantum cutting down-conversion pathway)

يجعل الوسط الفعال Ce:Nd:YAG ذا أهمية خاصة للباحثين في مجال الليزر الذي يعمل بالطاقة الشمسية.

6.II خاتمة

تم، في هذا الفصل، دراسة الإشعاع الشمسي، كما تمّ التعرّض لأهمّ المواد الصلبة المستعملة كأوساط فعّالة في مجال الليزر المُولّد بالطاقة الشمسية، حيث يُعدّ Nd:YAG من أفضل هذه المواد. لكن مدى تطابق طيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي ضعيف نسبياً (تداخل بنسبة 16% [4]). لذا و قصد تعريض طيف الامتصاص، تمّ التطرّق إلى دراسة تقنيّة التّطعيم المُضاعف بواسطة السيريوم (Ce) لزيادة نسبة التّطابق في طيف الامتصاص وطيف الانبعاث الشمسي و ذلك لتحسين إستطاعة الليزر المُنتج بواسطة الوسط الفعال Ce:Nd:YAG الذي له طيف امتصاص يتداخل بنسبة 32% مع طيف الانبعاث الشمسي [13], [58].

الفصل القادم يتّم فيه القيام بمحاكاة عددية باستخدام برنامجي Zemax® و LASCAD™ لزيادة نسبة تطابق طيفي الامتصاص و الانبعاث الشمسي، ثم يتمّ تحليل و مناقشة النّتائج المُحصّلة عليها باستعمال الأوساط الفعّالة Nd:YAG و Ce:Nd:YAG.

الفصل الثالث

المحاكاة العددية
و مناقشة النتائج

1.III مقدمة

تعتمد تقنية الليزر الشمسي على تركيز الأشعة الشمسية بغيرية الوصول إلى مستوى إشعاعي يسمح بخطي حاجز الضخ اللازم لحدوث الفعل الليزري. وهذا بالحصول على طريقة بديلة بسيطة وغير مكلفة لاستخدام الطاقة الشمسية وتحويلها مباشرة لأشعة الليزر، وذلك باستعمال طريقة الضخ (جانبي أو طرفي) والوسط الليزري الفعال الأنسب لهذه التقنية.

يتم، في هذا الفصل، القيام بعمل نمذجة و محاكاة عددية لمنظومة الليزر الشمسي (منظومة تحويل ضوء الشمس إلى ضوء الليزر) باستعمال برنامجي Zemax[®] و LASCAD[™] للحصول على أكبر استطاعة ممتصة من طرف الوسط الفعال. حيث يُستخدم أولاً الوسط Nd:YAG الذي يُعتبر من أهم المواد المستخدمة في مجال الليزر المؤلّد بالطاقة الشمسية، ثم الوسط Ce:Nd:YAG ذو التطعيم المضاعف بالسيريوم (Ce) لتحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي. وفي الأخير، يتم تحليل، مناقشة ومقارنة النتائج في كلتا الحالتين.

2.III المحاكاة العددية

تمت عملية تصميم وتحسين المنظومة باستعمال برنامجي المحاكاة Zemax[®] و LASCAD[™] حيث:

- Zemax[®]: يسمح بنمذجة الأنظمة البصرية وتحليلها والمساعدة على تصميمها.
- LASCAD[™]: يعمل على الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرئاة الليزر [39].

1.2.III برنامج Zemax[®] لتصميم منظومة الليزر الشمسي

Zemax[®] هو برنامج تصميم بصري ذو استخدام واسع. يُستعمل لتصميم الأنظمة الضوئية وتحليلها. تم إطلاق الإصدار الأول منه سنة 1990 تحت اسم Max كأول برنامج تصميم بصري لنظام التشغيل Windows، ثم تم تغييره لاحقاً إلى اسمه الحالي Zemax[®]. يعتمد أساس هذا البرنامج على تتبع الأشعة والحزم الضوئية ونمذجة الأشعة من خلال نظام بصري. كما يُمكننا Zemax[®] من تصميم عناصر بصرية مختلفة مثل العدسات العادية والعدسات شبه الكروية والمرايا والعناصر البصرية التفاضلية. من الممكن أيضاً إنتاج رسوم بيانية تحليلية قياسية مثل الرسوم البيانية التقطية والأشعة السينية الجزئية [76].

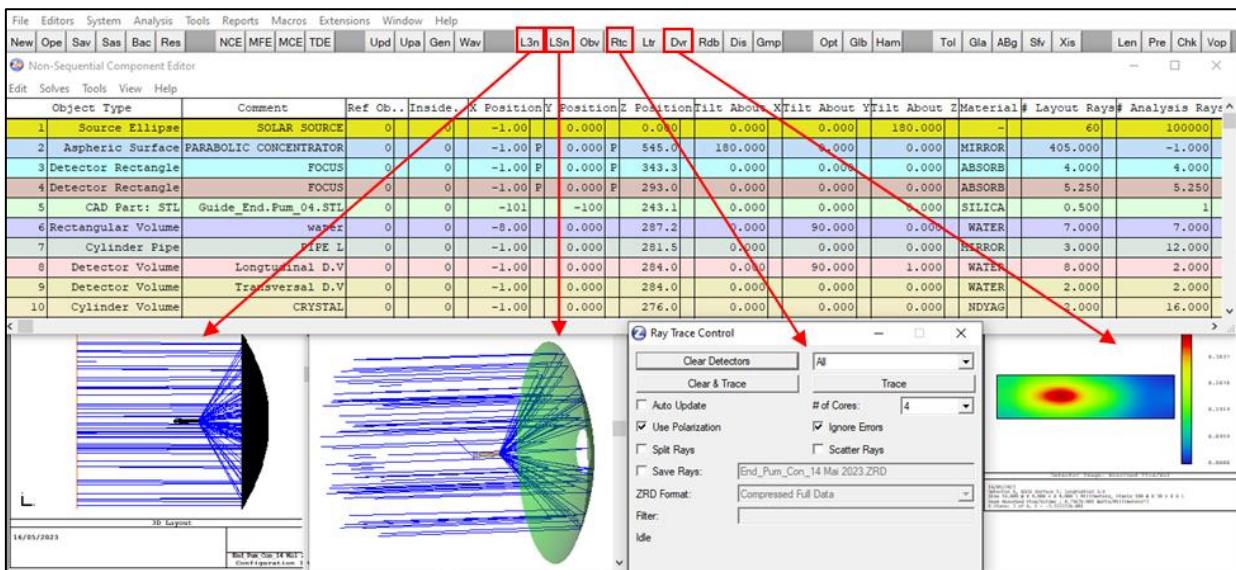
يستطيع هذا البرنامج أن يقوم بتتبع الأشعة الأصلية خلال العناصر البصرية من عنصر إلى آخر بالتتابع عن طريق نمط تتبع الشعاع المتسلسل (Sequential mode) كتصميم الأنظمة التقليدية مثل العدسات والتلسكوب. وكذلك تحليل الضوء الشارد من دون تتابع في العناصر عن طريق نمط تتبع الأشعة غير المتسلسل (Non-Sequential mode) كتصميم المواشير والألياف البصرية ونمذجة أنظمة الضخ الشمسي. تتطلب عمليات المحاكاة غير المتسلسلة عادةً وقتاً أطول للحصول على نتائج دقيقة. يمكن تقسيم جميع الكائنات غير المتسلسلة إلى ثلاثة أنواع: المصادر والعناصر الهندسية البصرية والكواشف (Sources, geometric optical elements and detectors) [39].

برنامج Zemax[®] يستطيع أيضاً نمذجة تأثير الطلاء البصري على أسطح المكونات. علاوة على ذلك، يحوي البرنامج مكتبة ضخمة للأنظمة الضوئية المختلفة كما يُتيح إضافة عناصر ضوئية جديدة إلى مكتبته. يضم البرنامج طرائق عديدة لتقييم أداء التصميم عن طريق توزيع الاستضاءة ودوال الانتشار البصري واستخدام الكواشف [39].

يحتوي Zemax® على أنواع مختلفة من النوافذ، كل منها يخدم غرضاً محدداً أهمها [77]:

- **النّافذة الرئيسيّة:** يحتوي شريط النّافذة الرئيسي على العديد من رؤوس القوائم المنسدلة مثل: (File, Editors, System, Analysis, Tools, Help...).
- **نوافذ المحرّر:** نوافذ المحرّر تُستخدم أساساً لإدخال البيانات.
- **نوافذ النّص:** يتم استخدام نوافذ النّص لإظهار بيانات نصيّة مثل بيانات التعليمات والزّوايا والبيانات الرّقمية.
- **الحوارات:** معظم الحوارات صريحة؛ عادةً توجد أزرار "موافق" و "إلغاء" الشّائعة في نوافذ حوار نظام Windows.

استُخدمت، في هذه المُحاكاة، نسخة البرنامج (Zemax® 2014). يُوضّح الشكل (1.III) نافذة برنامج Zemax®.



الشكل (1.III): صورة توضح واجهة برنامج Zemax®.

يملك كل عنصر من نافذة المحرّر في البرنامج إحداثيات على المحاور (x,y,z) وزوايا دوران حول هذه المحاور، أمّا الخانات الأخرى تختلف من عنصر إلى آخر، حيث تُسجل فيها خصائص ومميّزات كل عنصر.

2.2.III المصادر (Sources)

هي الكائنات المُستخدمة لإصدار أشعة المحاكاة، وبالتالي تمثل مصادر الضّخ، وهي ضوء الشّمس في الليزر الشمسي.

3.2.III العناصر البصريّة الهندسيّة (geometric optical elements)

تحدّد المكوّنات الضوئية التي يتم فيها امتصاص الأشعة المُنبعثّة، وانكسارها، وانعكاسها، وانحرافها، وتشتملها، وتقسيمها، وما إلى ذلك. تمثل هذه الكائنات في هذه الحالة مكوّنات نظام تجميع وتركيز الطاقة الشمسيّة ومكوّنات رأس الليزر.

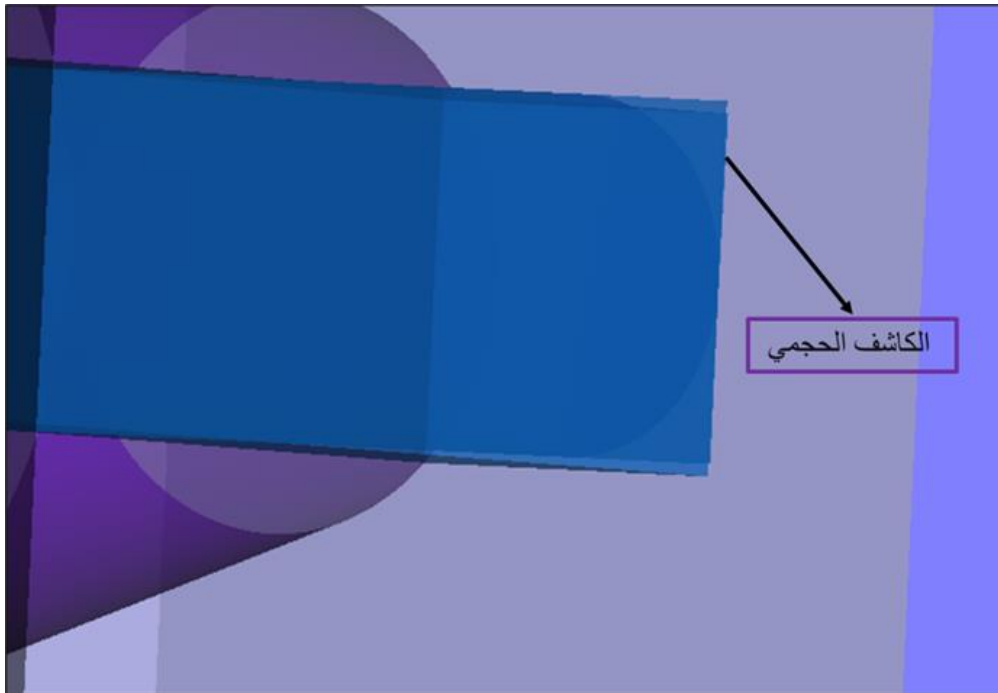
4.2.III الكواشف (detectors)

تُحدّد المعلومات النوعيّة و/أو الكميّة للأشعة الواردة باستخدام هذه الكائنات.

5.2.III تحليل طاقة الضّخ الممتصة

لتوفير معلومات عن طاقة الضّخ الواردة أو الممتصة، من الضروري استخدام الكواشف في Zemax®. على سبيل المثال لاكتشاف المعلومات العددية في بؤرة المُرْكُز، عادة ما يتم استخدام الكاشف السطحي المستطيل (Detector Rectangle). يسمح الكاشف المستطيل بتسجيل قدر أكبر من البيانات، مثل الطاقة الواردة والزّاوية، وتوزيع الطاقة ثنائي الأبعاد وملف تعريف الطاقة الواردة أو الممتصة في المنطقة التي يحددها الكاشف. يمكن وضع هذا النوع من الكواشف إمّا داخل أو خارج الجسم وله وظيفة الامتصاص أو الانعكاس أو عدم وجود أي تأثير على الإشعاع الساقط. ومع ذلك يقتصر شكل الكاشف على سطح مستطيل يحدده المستخدم. يمكن ضبط دقة الصورة عن طريق تحديد عدد وحدات البيكسل (pixels) للكاشف، مع مراعاة التأثير على إجمالي الوقت المطلوب لكل محاكاة [39].

لتحليل طاقة الضّخ الواردة أو الممتصة داخل مَادّة الليزر (الوسط الفعّال)، يُستخدم كاشف حجمي (Detector Volume) ذو شكل متوازي السطوح للحصول على معلومات الطاقة، كما يوضّح الشكل (2.III). يتم تحديد أبعاده من قبل المستخدم، وكذلك عدد وحدات الفوكسل (voxels). دقة عنصر الكاشف الحجمي لها أيضاً تأثير كبير على وقت المحاكاة في نمط تتبّع الأشعة غير المتسلسل لـ Zemax®.



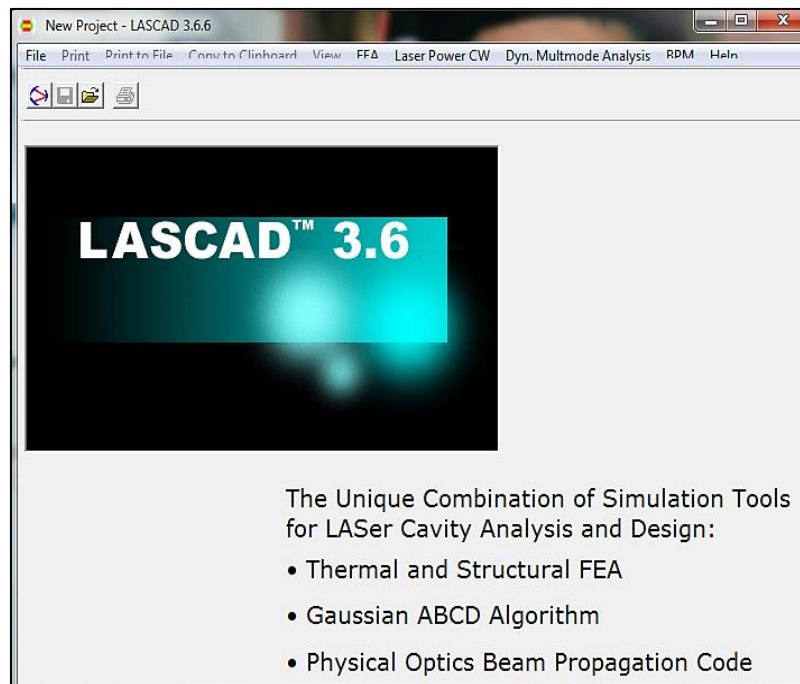
الشكل (2.III): تصميم الوسط الفعّال و الكاشف الحجمي في برنامج Zemax®.

ينقسم الكاشف الحجمي لوسط الليزر إلى عدد معيّن من وحدات الفوكسل. يتم العثور على طول المسار في كل فوكسل. بهذه القيمة ومعامل الامتصاص الفعّال لوسط الليزر، من الممكن تصميم النظام البصري بأكمله وتحديد معلوماته، والذي ينقل طاقة الضّخ إلى الوسط الفعّال لليزر الشمسي. يمكن حساب طاقة الضّخ الشمسي داخل وسط الليزر عددياً عن طريق جمع إشعاعات الضّخ الممتصة لجميع المناطق.

بعد ذلك، تتم معالجة بيانات تدفق الضّخ الممتصة من تحليل Zemax® بواسطة برنامج LASCAD™ لدراسة معلومات شعاع الليزر وتحديد التأثيرات الحرارية المطبقة في الوسط الفعّال [39].

6.2.III برنامج LASCAD™ لمحاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي

يُتيح برنامج LASCAD™ (LASer Cavity Analysis & Design) الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنان الليزر: تحليل العناصر الحرارية والبنية المتناهية (FEA: Finite Element Analysis)، دليل الانتشار للحزمة الغاوسية ABCD، و خوارزمية انتشار الحزم غير الغاوسية - طريقة انتشار الحزمة (BPM: Beam Propagation Method). وبالتالي من الممكن نمذجة تجاويف الرنين من خلال تحليل: تأثيرات العدسة الحرارية (والتي تُعدّ واحدة من المشاكل الرئيسية في ليزر الحالة الصلبة)، طاقة خرج الليزر متعدّد الأنماط و TEM₀₀، كفاءة الليزر، جودة ومظهر شعاع الليزر، وكذلك انتشار شعاع الليزر خارج تجويف الليزر، مع مراعاة العديد من ثوابت الليزر؛ مثل الانعكاسية ونصف قطر الانحناء والمسافة بين مكونات التجويف وخسائر الانعراج و ربح التشبع ... إلخ [25], [39]. الشكل (3.III) يوضح نافذة واجهة برنامج LASCAD™.

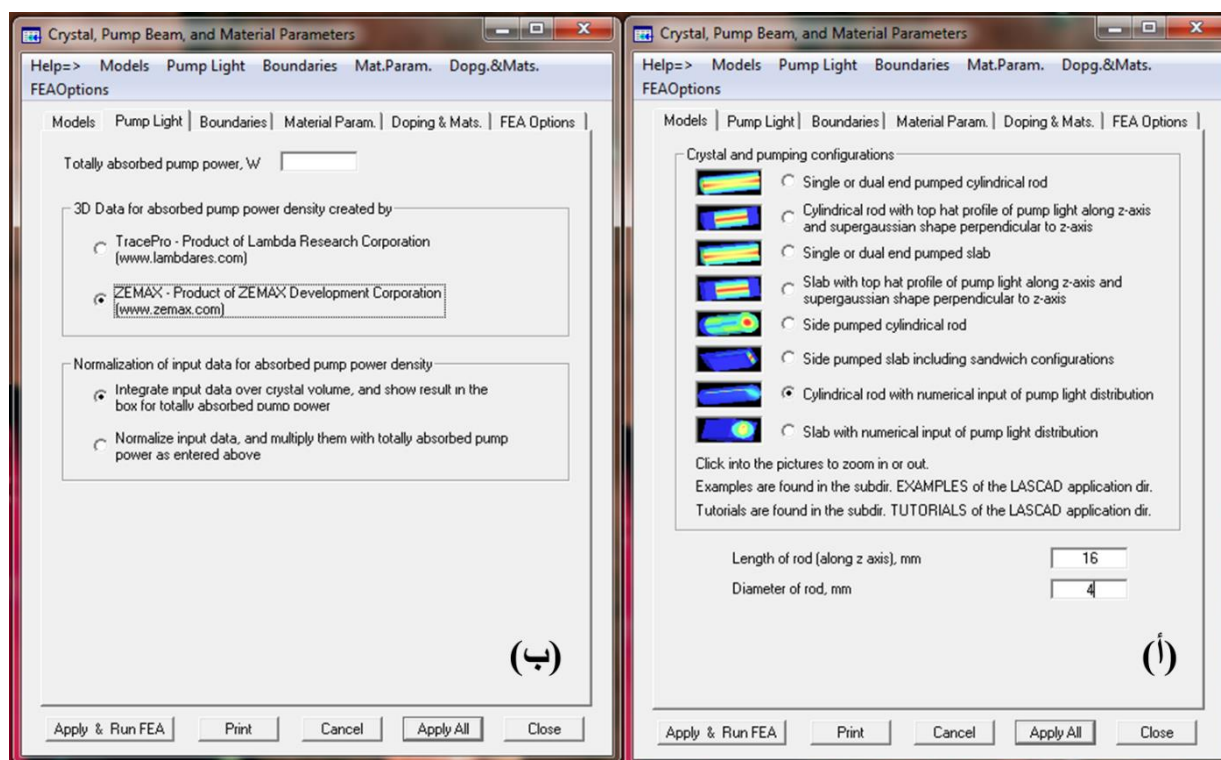


الشكل (3.III): صورة توضح واجهة برنامج LASCAD™.

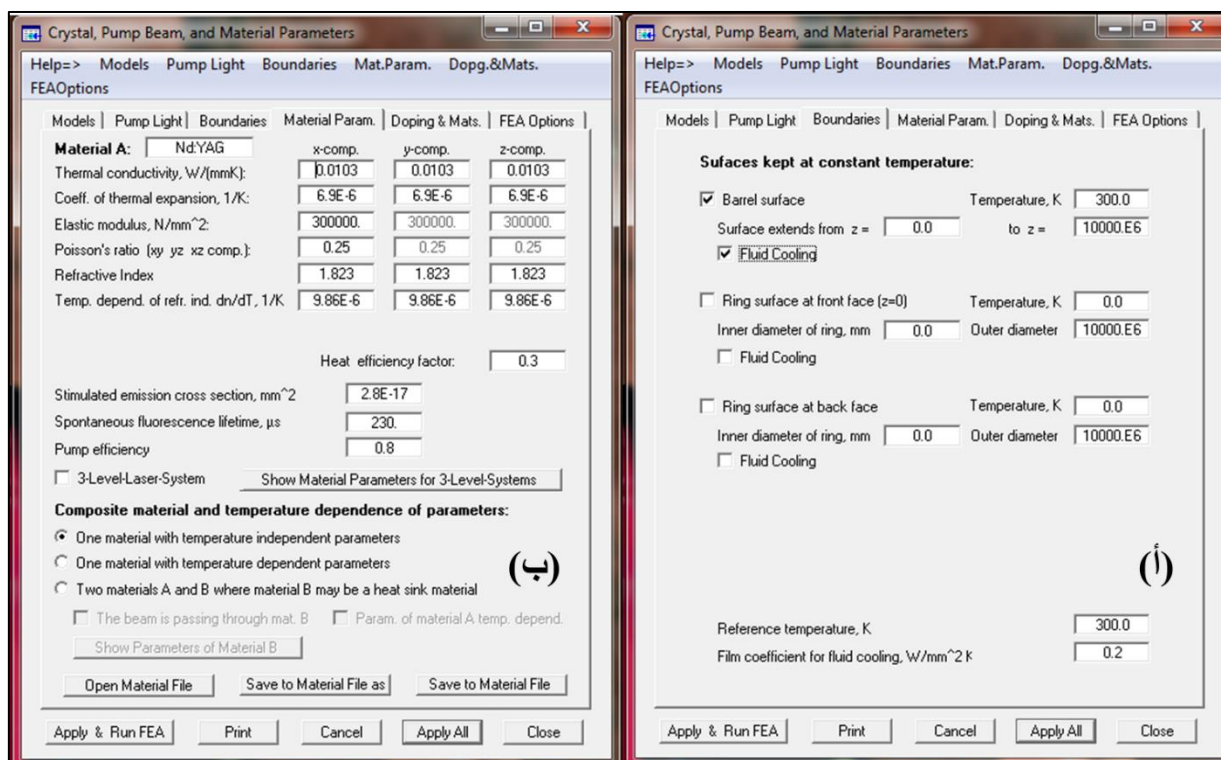
7.2.III تحليل العناصر المتناهية (FEA) للتأثيرات الحرارية

يُحسب تحليل العناصر المتناهية (FEA) المتغيرات الناتجة عن الحرارة والضغط في بلورة الليزر، مع مراعاة متغيرات مادة الليزر ومكونات مصدر الضخ وهندسة التبريد. يُوفّر LASCAD™ عدّة نماذج مُحدّدة مُسبقاً للتصاميم النموذجية، كما هو موضح في الشكل (4.III) (أ). ومع ذلك، قد يكون لخطة الضخ خصائص خاصة جداً، والتي لم يتم تحديدها في النماذج المحدّدة مسبقاً من LASCAD™، كما في حالة الليزر الذي يتم ضخّه بالطاقة الشمسية. وبالتالي لنمذجة أنظمة الليزر الشمسي بدقة، من الممكن استيراد الملفات من برنامج المحاكاة Zemax® (أو TracePro®)، الذي يمثل محتواه التوزيع ثلاثي الأبعاد لطاقة الضخ المُمتصة بواسطة الوسط الفعّال المُحدّد في Zemax®، كما هو موضح في الشكل (4.III) (ب).

يتم تحديد متغيرات التبريد للوسط الفعّال، بالإضافة إلى خصائص المواد، على التوالي في قوائم الحدود ومتغيرات المواد، الشكل (5.III) (أ) و (ب) [39].



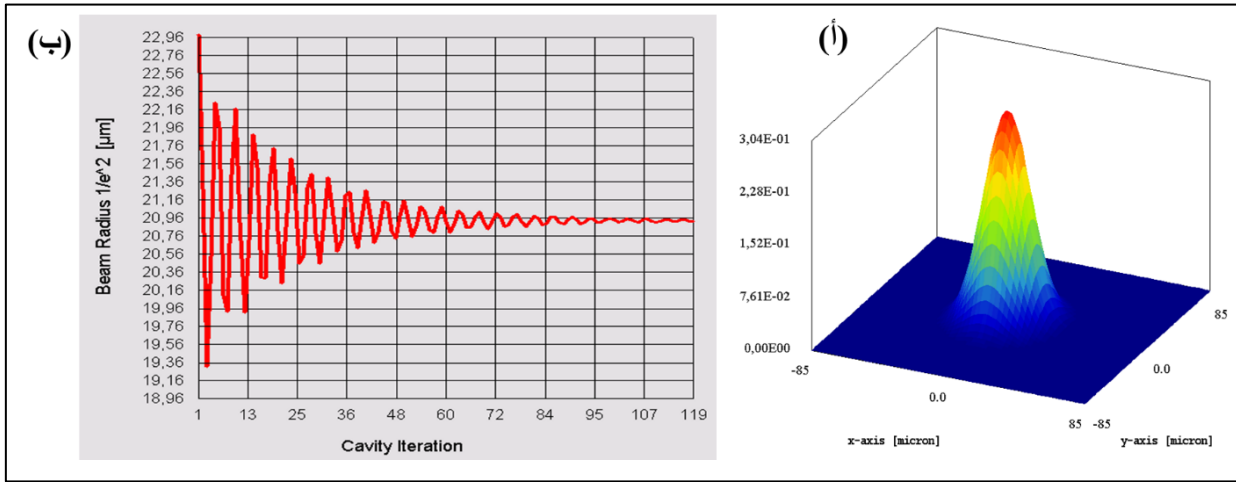
الشكل (4.III): (أ) نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامج LASCAD™. (ب) تحديد مصدر النصّ العددي الذي يمثل الاستطاعة المُمتصة من طرف الوسط الفعّال من خلال ملف بيانات Zemax®.



الشكل (5.III): (أ) متغيّرات تحديد درجة حرارة الغرفة. (ب) متغيّرات مادّة الوسط الفعّال (Nd:YAG).

8.2.III طريقة انتشار شعاع الليزر (BPM)

الحالات التي يكون فيها التقريب المكافئ ورمز مصفوفة ABCD غير كافيين، يمكن فيها استخدام نتائج FEA كمُدخلات لطريقة انتشار الحزمة (BPM) لتحويل فورييه السريع [78]. يوفر هذا الرمز محاكاة ثلاثية الأبعاد كاملة لتفاعل واجهة موجة تنتشر عبر بلورة الليزر الساخنة المشوهة حراريًا. استنادًا إلى مبدأ Fox و Li [79]، يتم حساب سلسلة من الرحلات ذهابًا وإيابًا عبر الرنان، والتي تتقارب أخيرًا مع الوضع الأساسي، الشكل (6.III) (أ)، أو لتراكب الأنماط العرضية ذات الترتيب الأعلى. يتم أيضًا توضيح ملف تعريف الكثافة في مرآة الإخراج، حيث يتطور مع زيادة عدد التكرارات أثناء تشغيل الحساب، كما هو ملاحظ في الشكل (6.III) (ب). رمز BPM يأخذ أيضًا في الاعتبار ديناميكيات الكسب وتأثيرات الانعراج، بسبب الامتداد المحدود للفتحات والمرايا [39].

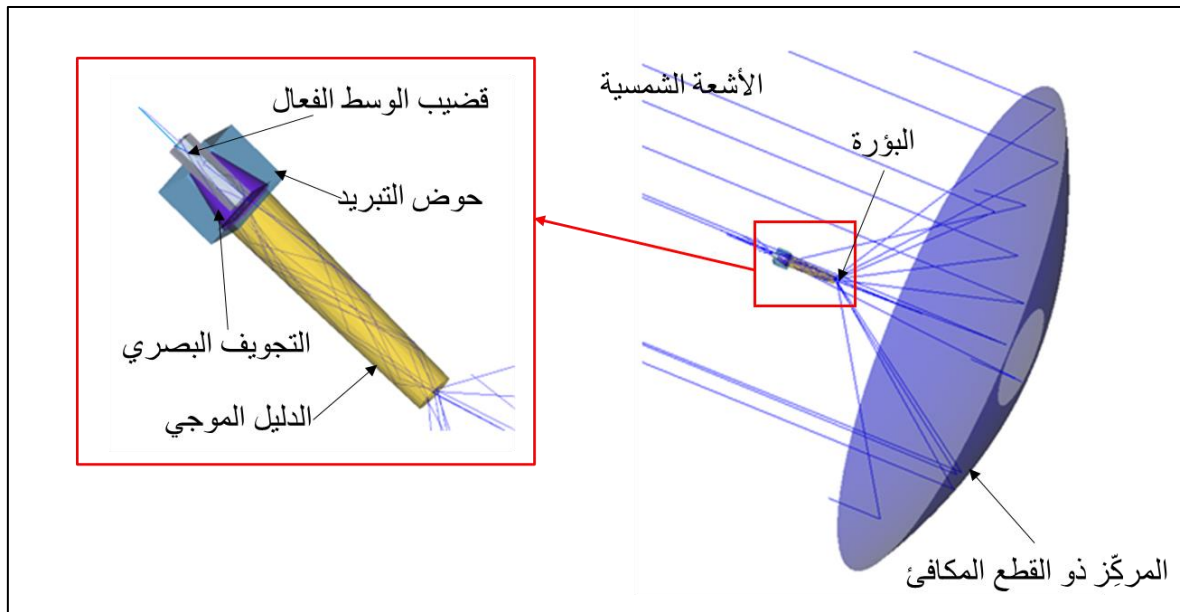


الشكل (6.III): (أ) ملف شعاع المرآة الناتج. (ب) نصف قطر شعاع الليزر BPM على تكرار التجويف [39].

3.III منظومة الليزر الشمسي

تتكون منظومة الليزر الشمسي التي سنقوم بمحاكاتها ببرنامج Zemax® من المكونات التالية والموضحة في الشكل (7.III):

- منظومة التركيز الأولية (المركز ذو القطع المكافئ).
- الدليل الموجي.
- التجويف البصري.
- الوسط الفعال (قضيبي Nd:YAG أو Ce:Nd:YAG).
- التجويف الرنيني.
- حوض التبريد.



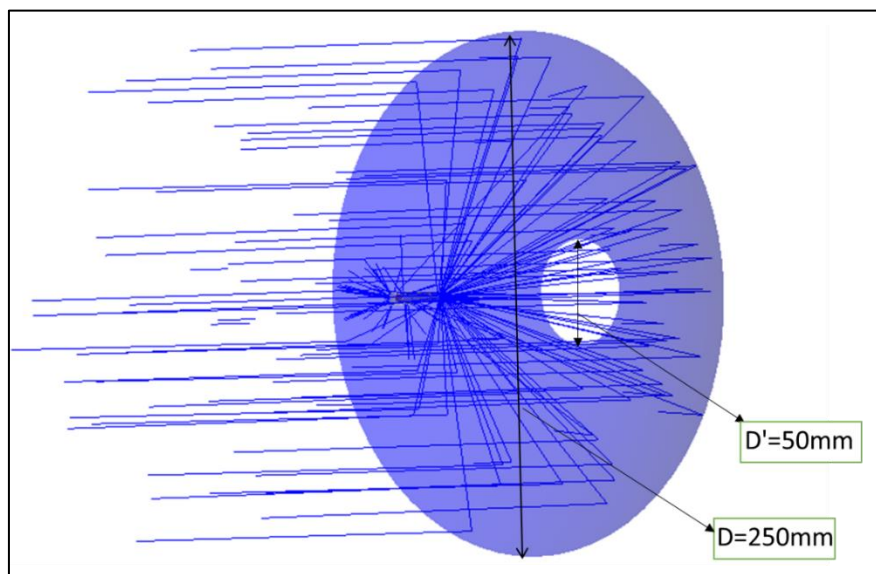
الشكل (7.III): رسم تخطيطي يوضح منظومة الليزر الشمسي المقترحة.

1.3.III منظومة التركيز الأولية (المركز ذو القطع المكافئ)

توجد عدة أنواع من المراكز الشمسية منها المركز ذو القطع المكافئ وعدسات فريزل والمراكز الأسطوانية وأبراج الطاقة... إلخ [80]. اخترنا في هذا العمل المركز ذا القطع المكافئ لمزاياه، نذكر منها:

- لأنه موجّه دوماً باتجاه الشمس، لذلك يُعتبر ذو كفاءة عالية.
- له نسب تركيز بحدود 600 إلى 2000، وبالتالي كفاءته عالية في تركيز الطاقة الشمسية.
- يمكنه العمل بشكل مستقل أو كجزء من نظام موسّع.

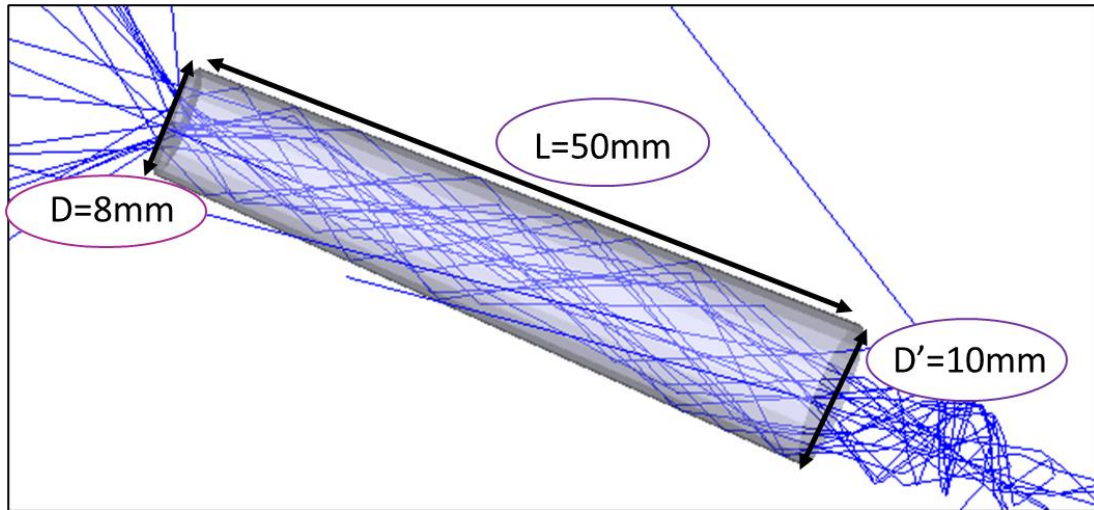
نصف قطر هذا المركز ($D=250\text{mm}$)، تتوسطه فتحة نصف قطرها ($D'=50\text{mm}$) لتخفيف الضغط في حالة وجود رياح، والاستفادة منها بنقل الأشعة المركزة ليكون التركيز في الخلف، وذلك بوضع مرآة عاكسة عند البؤرة كما هو موضح في الشكل (8.III). تم اختيار هذه الأبعاد للحصول على نسبة تركيز عالية.



الشكل (8.III): رسم تخطيطي يوضح تركيز الأشعة بواسطة المركز ذي القطع المكافئ.

2.3.III الدليل الموجي

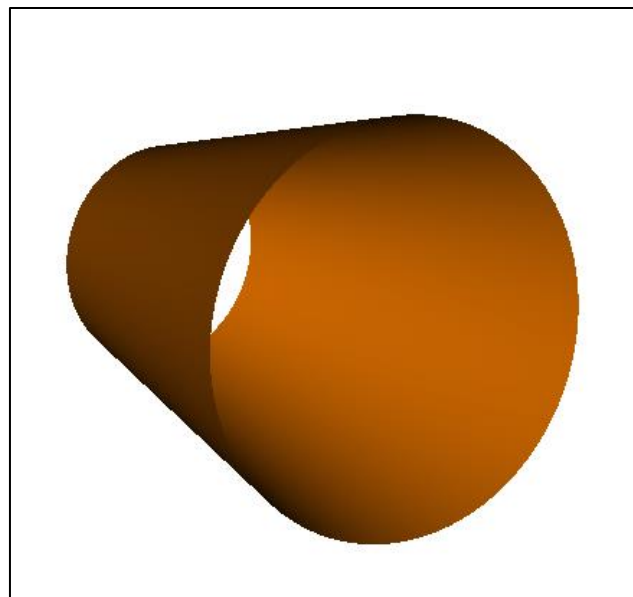
عبارة عن قناة مصنوعة من مادة السيليكا موجّهة لحزمة الإشعاع المُركّزة عند بؤرة القطع المكافئ بهدف نقلها إلى المادّة الفعّالة مع الحفاظ عليها من التشتّت أو الفقدان، بتطبيق مبدأ الانعكاس الكلي اعتماداً على اختلاف قرينة الانكسار بين المادّة الفعّالة والهواء. يتم اختيار شكل الدليل على حسب نوع التّركيز نُقْطِي أو خطّي وطريقة الضّخ. وبما أننا استعملنا المُركّز ذا القطع المكافئ فهو مُركّز نُقْطِي. لذا اخترنا دليل موجي يتناسب مدخله مع قطر البؤرة $D=8\text{mm}$ ويتناسب مخرجه مع قطر الوسط الفعّال $D'=10\text{mm}$ بينما طوله $L=50\text{mm}$ ، كما هو مُوضّح في الشكل (9.III).



الشكل (9.III): رسم تخطيطي يوضح أبعاد الدليل الموجي.

3.3.III التّجويف البصري

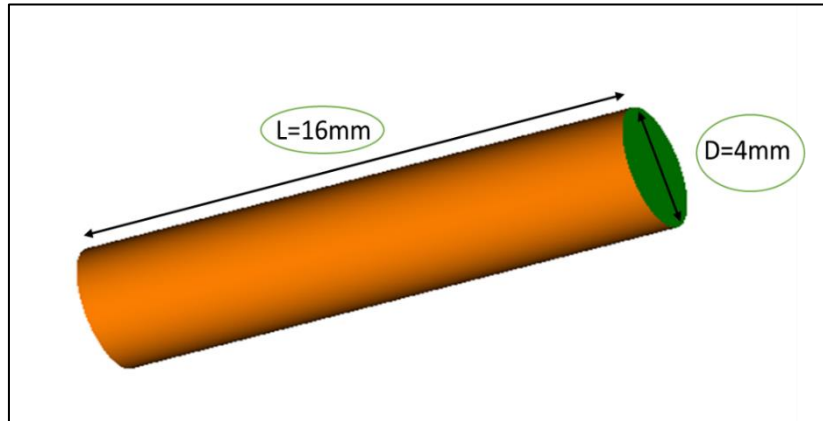
كي نضمن توزيع الأشعة على كامل جوانب القضيب، نستعمل تجويفاً بصرياً على شكل قُمع لأسطحه الداخليّة مرايا ذات درجة انعكاسيّة عالية لتجنب الضياع في الإشعاع الواصل له. نصف قطر مدخله $R=6\text{mm}$ ونصف قطر مخرجه $r=3\text{m}$. كما يوضح الشكل (10.III).



الشكل (10.III): رسم تخطيطي يوضح التّجويف البصري.

4.3.III وسط الليزر (الوسط الفعال)

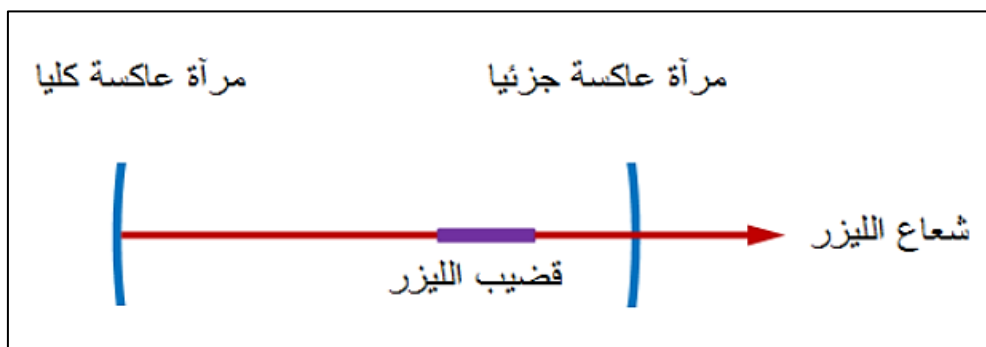
نستعمل في هذه الدراسة وسطين ليزريين. أولاً، نستخدم قضيباً من مادة عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم Nd:YAG، ثم نستعمل مادة عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو النّطعيم المضاعف بالنيوديميوم والسيريوم (Ce:Nd:YAG). وهي مادة وسط فعال لليزر لها حمل حراري أقل وإنتاج طاقة أعلى من Nd:YAG، كما تتمتع هذه المادة بمقاومة جيّدة للضرر الذي تسببه الأشعة فوق البنفسجية من مصدر الضّخ، وعتبة منخفضة لليزر. حيث تم استبدال 1.1-1.4% من ذرات Y^{+3} بـ Nd^{+3} ، و0.05-0.1% بـ Ce^{+3} . أبعاد القضيب المُستخدم في هذه الدراسة هي: $L=16mm$ و $D=4mm$ ، كما يوضحها الشكل (11.III).



الشكل (11.III): رسم تخطيطي يوضح أبعاد القضيب لمادة ليزر Ce:Nd:YAG.

5.3.III التّجويف الرّنيني

التّجويف الرّنيني أو ما يسمى المرنان، من المكونات الرئيسية لجهاز الليزر وهو منظومة من مرأتين توضع على محور بصري مشترك مع الوسط الفعال حيث تنتقل الفوتونات بين المرأتين ذهاباً وإياباً مروراً بالوسط الفعال من أجل تضخيمها. تكون إحدى هاتين المرأتين ذات انعكاسية تامة 100% (الخلفية)، والمرأة الأخرى تكون ذات انعكاسية جزئية (الأمامية) [25]. كما يوضحه الشكل (12.III).

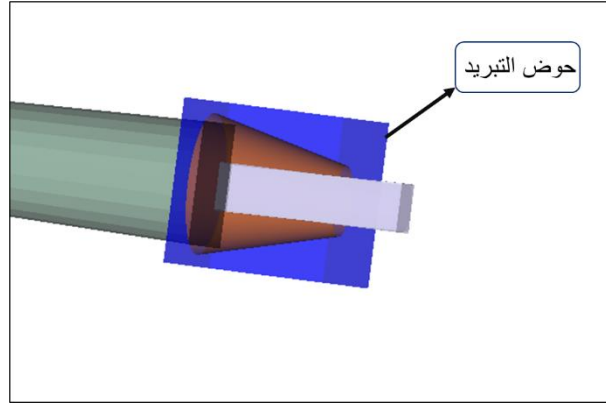


الشكل (12.III): رسم تخطيطي يوضح التجويف الرّنيني [39].

6.3.III حوض التبريد

ترتفع درجة حرارة الوسط الفعال عند توليد أشعة الليزر، وهذا ناتج عن الانتقالات غير المشعة والتي تكون مصحوبة بانتشار حرارة. مما يستوجب لتفادي تآلفه التّخفيض من درجة حرارته، ويكون ذلك بواسطة حوض التبريد باستعمال الماء وتحت ضغط معين مناسب، كما يُظهر الشكل (13.III).

قصد تثبيت منظومة الليزر الشمسي، يجب وضع كل من عناصرها (الدليل الموجي، التجويف البصري، الوسط الفعال) في منظومة ميكانيكية تحتوي على فتحتين، ليتم انتقال الفوتونات عبرها ذهاباً وإياباً للمرأتين العاكستين مروراً بالوسط الفعال قصد التضخيم، وفتحتين لإدخال وإخراج الماء المستعمل للتبريد.



الشكل (13.III): رسم تخطيطي يوضح حوض التبريد.

4.III نتائج المحاكاة العددية باستعمال برنامج Zemax® لـ Nd:YAG

للتمكن من قياس الاستطاعة تُستعمل الكواشف، حيث يتم وضعها في الأماكن التي يُراد قياس الاستطاعة فيها، كالآتي:

- الكاشف الأول (كاشف سطحي 1): عند بؤرة المُرَكِّز (قياس الاستطاعة المُرَكَّزة).
- الكاشف الثاني (كاشف سطحي 2): عند مخرج الدليل الموجي (قياس الاستطاعة المنقولة بواسطة الدليل الموجي).
- الكاشف الثالث (كاشف حجمي طولي + عرضي): حول الوسط الفعال (قياس الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال).

1.4.III قياس الاستطاعة الضوئية عند بؤرة التركز (الكاشف الأول)

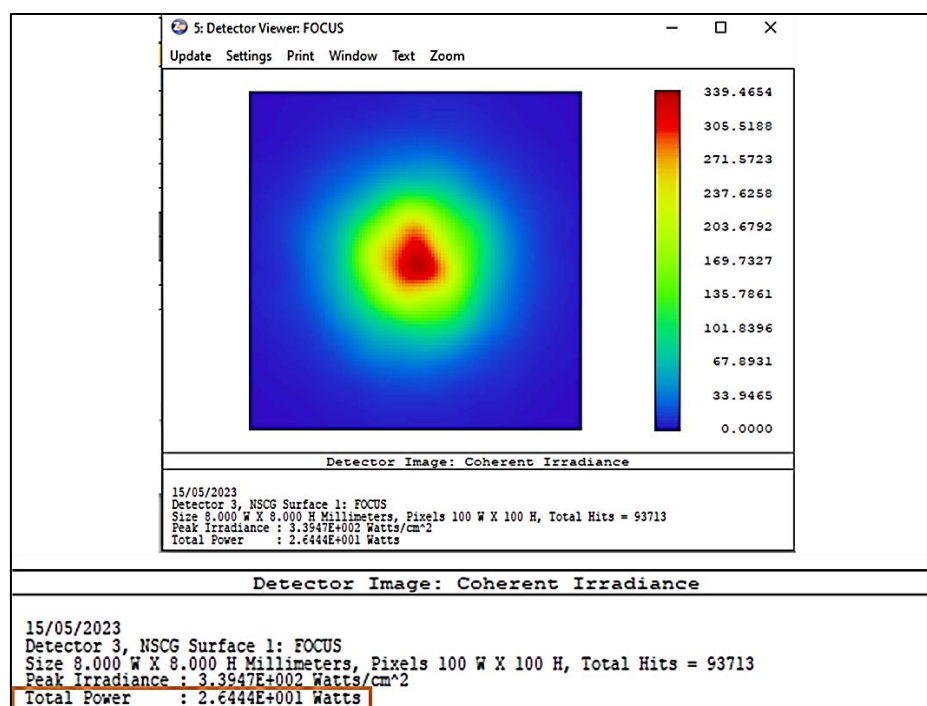
نقوم باستعمال اشعاع شمسي ساقط على الأرض قيمته 950W/m^2 [25] ، [58] ومُرَكِّز ذي قطع مكافئ مساحته (0.20m^2) ، لنحسب استطاعة المنبع كالتالي:

$$[950 \times (R^2 \times \pi)] \times 0.16 \times 0.95 = 29.85\text{W} \quad (1\text{-III})$$

حيث:

- R: نصف قطر المُرَكِّز ذي القطع المكافئ [m].
- 16%: نسبة تطابق طيف الامتصاص لـ Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي [4].
- 95%: نسبة انعكاسية المرآة (المُرَكِّز الأولي).

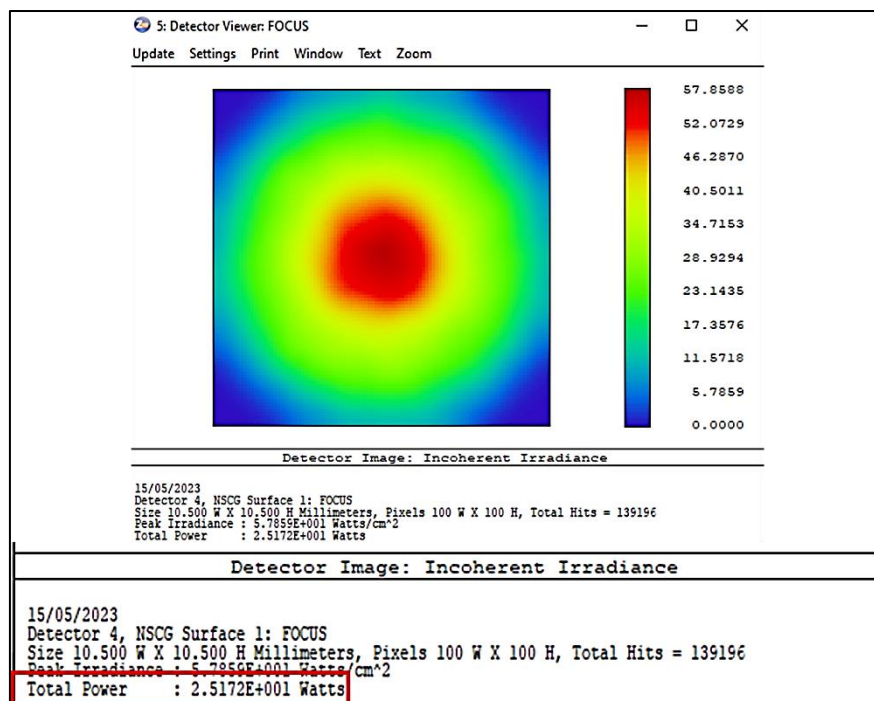
الكاشف الضوئي المتواجد في بؤرة المُرَكِّز يُمكننا من قياس الطاقة الشمسية المُرَكَّزة في هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها، وذلك بعد عمليات ضبط تموضع الكاشف. الاستطاعة المُرَكَّزة تساوي 26.44W بتوزيع غاوسي، كما يظهر في الشكل (14.III).



الشكل (14.III): صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة الشمسية عند بؤرة المُرْكُز.

2.4.III قياس الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي (الكاشف الثاني)

تم قياس الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي بواسطة كاشف سطحي ثنائي حيث قُدرت بـ: 25.17W، كما يُوَضَّح الشكل (15.III).



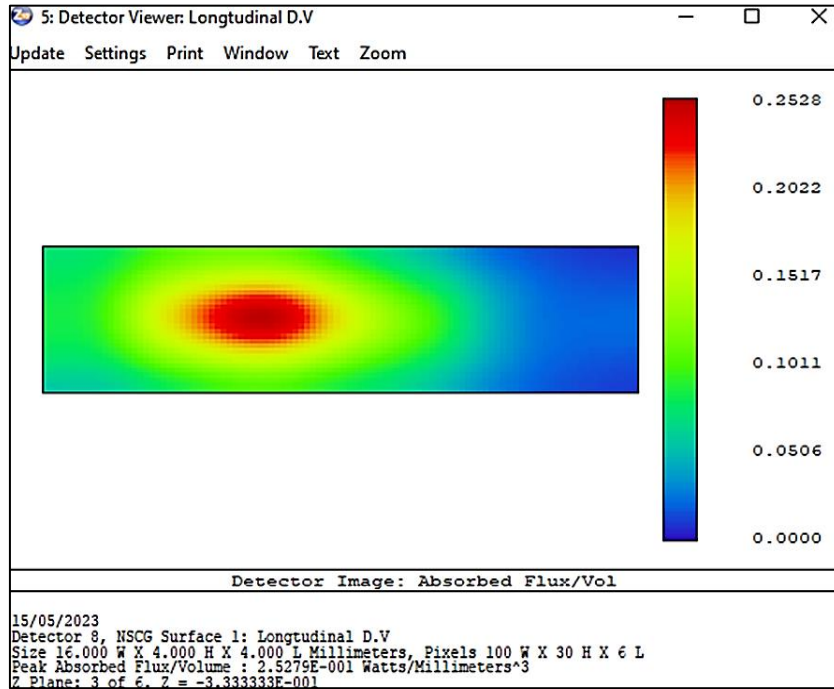
الشكل (15.III): صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة عند مخرج الدليل الموجي.

نلاحظ أنَّ هناك انخفاضاً في قيمة الاستطاعة: من 26.44W إلي 25.17W، ومنه نستطيع حساب كفاءة نقل الأشعة للدليل الموجي وذلك بالعلاقة: $(25.17 \div 26.44 = 95.2\%)$.

يُرجع هذا التناقص في قيمة الاستطاعة إلى الضياعات داخل الدليل الموجي (الامتصاص، الانعكاس الداخلي غير التام) [37].

3.4.III قياس استطاعة الضوئية حول الوسط الفعّال (الكاشف الثالث)

لقياس استطاعة طاقة الضخ المُمتصة من طرف الوسط الفعّال (قضيب Nd:YAG) ومعرفة طريقة توزيعها، يُستعمل كاشف حجمي (نقاط حجمية والتي تسمى الفوكسل)، كما يُوضح الشكل (16.III).



الشكل (16.III): صورة توضح توزيع الاستطاعة المُمتصة من طرف القضيب (الوسط الفعّال Nd:YAG).

لا يُمكن معرفة قيمة الاستطاعة المُمتصة من طرف القضيب مباشرة من خلال الشكل (16.III)، وهذا يرجع لخصائص الكواشف. فالكواشف المسطحة تعطي نتيجة الاستطاعة مباشرة، أما الكاشف المستعمل في هذه الحالة على شكل ثلاثي الأبعاد (كاشف حجمي) فهو لا يعطي النتيجة مباشرة، لذا نستعين ببرنامج Excel®. نقوم بتخزين بيانات الشكل (16.III) على شكل نصّ في ملف يُفتح بعد ذلك في صفحة في برنامج Excel®. نقوم بجمع الاستطاعة المُمتصة في جميع نقاط الوسط الفعّال و المقاسة بواسطة الكاشف الحجمي حيث تم الحصول على استطاعة مُمتصة تقدر ب: 16.4W، كما هو موضح في الشكل (17.III).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
2														
3		Voxel	X	Center	Y	Center	Z	Center	Incident	Flux	Absorbed Flux	Absorbed/Vol		
4		1	-7,92E+00	-1,93E+00	-1,67E+00	4,21E-02	0,00E+00	0,00E+00						
5		2	-7,76E+00	-1,93E+00	-1,67E+00	4,49E-02	0,00E+00	0,00E+00						
		17997	7,44E+00	1,93E+00	1,67E+00	7,80E-03	0,00E+00	0,00E+00						
		17998	7,60E+00	1,93E+00	1,67E+00	6,29E-03	0,00E+00	0,00E+00						
		17999	7,76E+00	1,93E+00	1,67E+00	5,62E-03	0,00E+00	0,00E+00						
		18000	7,92E+00	1,93E+00	1,67E+00	4,22E-03	0,00E+00	0,00E+00						
						3,75E-13	1,03E+03	1,64E+01			1,16E+03			

الشكل (17.III): صورة توضح نتيجة الاستطاعة المُمتصة لـ Nd:YAG باستخدام برنامج Excel®.

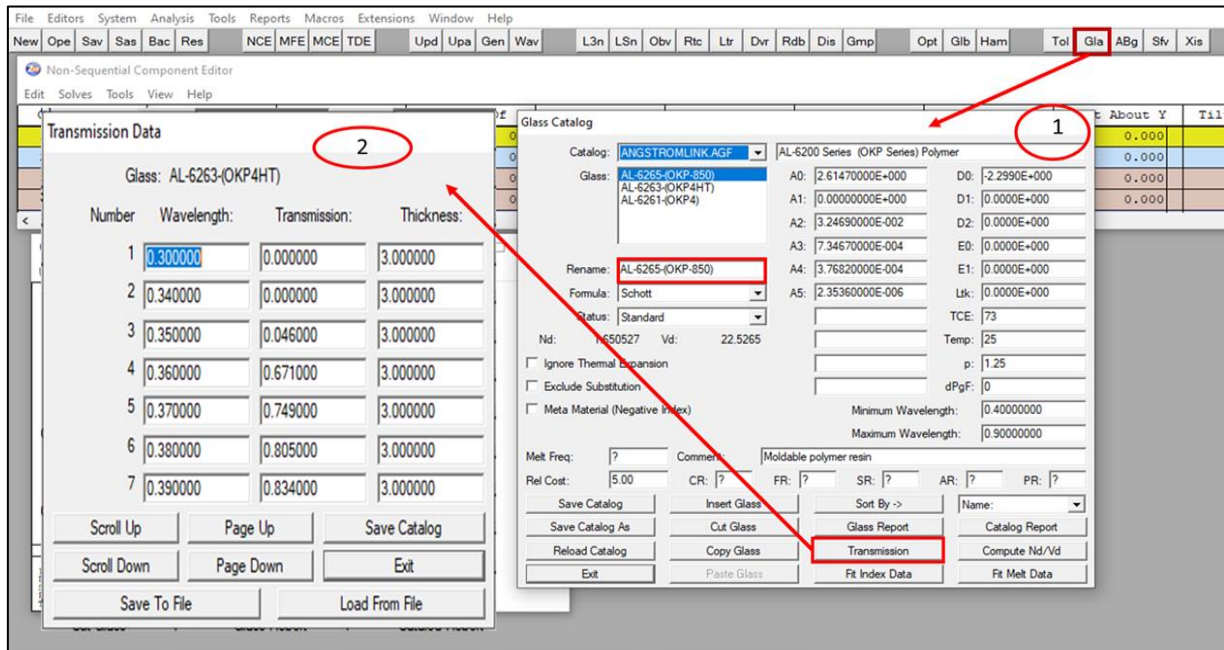
❖ نقوم في المرحلة المُوالية لهذا العمل، بنفس الخطّوات للوسط الفعّال Ce:Nd:YAG.

5.III نتائج المحاكاة العددية باستعمال برنامج Zemax® لـ Ce:Nd:YAG

هناك طريقتان لإدماج خصائص الوسط الفعال Ce:Nd:YAG وحساب الاستطاعة المُمتصة من طرفه:

الطريقة الأولى: يُمكننا ادخال مصدر الطاقة من خلال خصائص Zemax®:

وذلك بالنقر على أيقونة **Gla** وإدراج مادة جديدة، ثم تحديد جميع خصائصها. وبعد ذلك، إدراج الاطوال الموجية وخصائصها، كما يوضح الشكل (18.III).



الشكل (18.III): صورة توضح خطوات إدراج مادة جديدة في برنامج Zemax®.

الطريقة الثانية: حساب الاستطاعة المُمتصة من طرف الوسط الفعال باستعمال النسبة المُحسنَة للتداخل لطيف الامتصاص للوسط الفعال لـ Ce:Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي، بإدراجها في مُعادلة حساب طاقة المنبع ثم تحميلها في خانة الطاقة وإكمال باقي المراحل حتى الحصول على الاستطاعة المُمتصة. نختار الطريقة الثانية، وذلك لسهولة توفر معلوماتها تحت نفس الشروط للمادة الأولية قبل التطعيم المضاعف.

1.5.III قياس الاستطاعة الضوئية عند البؤرة (الكاشف الأول)

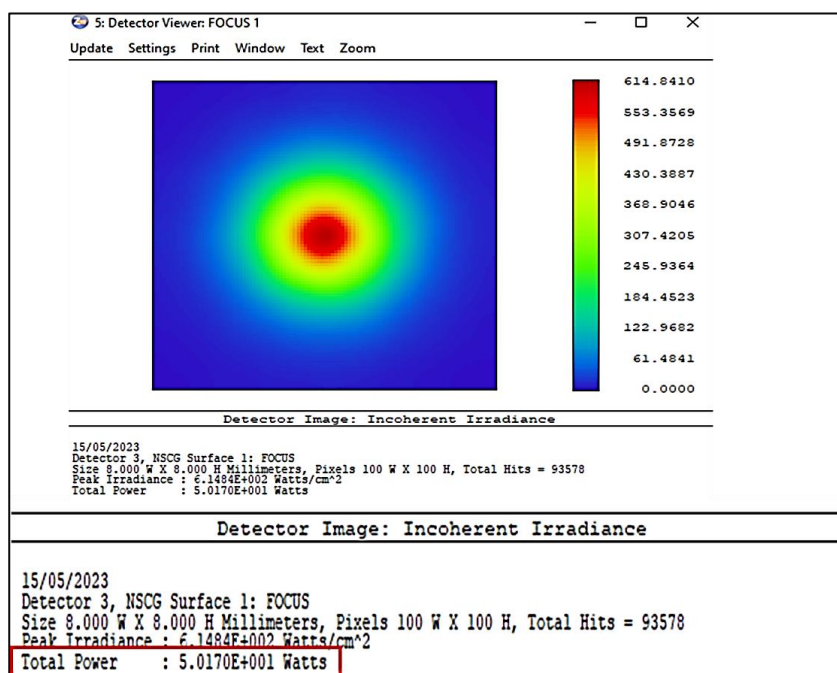
نقوم باستعمال اشعاع شمسي ساقط على الأرض قيمته 950 W/m^2 [25] ، [58] ومُرَكِّز ذي قطع مكافئ مساحته (0.20 m^2) ، لنحسب استطاعة المنبع كالتالي:

$$[950 \times (R^2 \times \pi)] \times 0.32 \times 0.95 = 56.70 \text{ W} \quad (2\text{-III})$$

حيث:

- R : نصف قطر المُرَكِّز ذي القطع المكافئ [m].
- 32% : نسبة تطابق طيف الامتصاص لـ Ce:Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي [13].
- 95% : نسبة انعكاسية المرآة (المُرَكِّز الأولي).

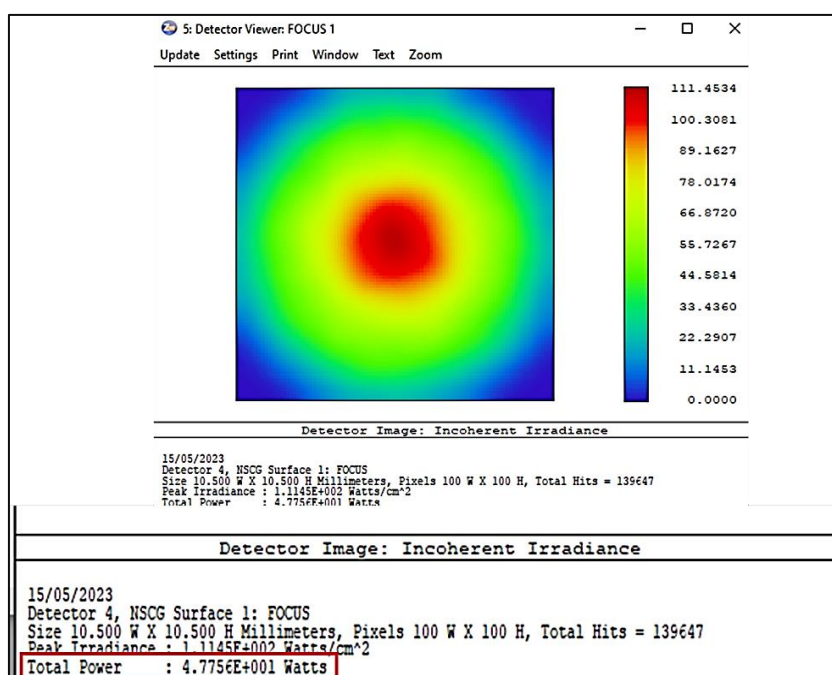
الكاشف الضوئي المتواجد في بؤرة المركز يُمكننا من قياس الطاقة الشمسية المركزة في هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها، وذلك بعد عمليات ضبط تموضع الكاشف. الاستطاعة المركزة تساوي 50.17W بتوزيع غاوسي، كما يظهر في الشكل (19.III).



الشكل (19.III): صورة توضح قيمة و توزيع الأشعة الشمسية عند بؤرة المركز.

2.5.III قياس الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي (الكاشف الثاني)

تم قياس الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي بواسطة كاشف سطحي ثاني حيث قُدرت بـ: 47.75W، كما يوضح الشكل (20.III).

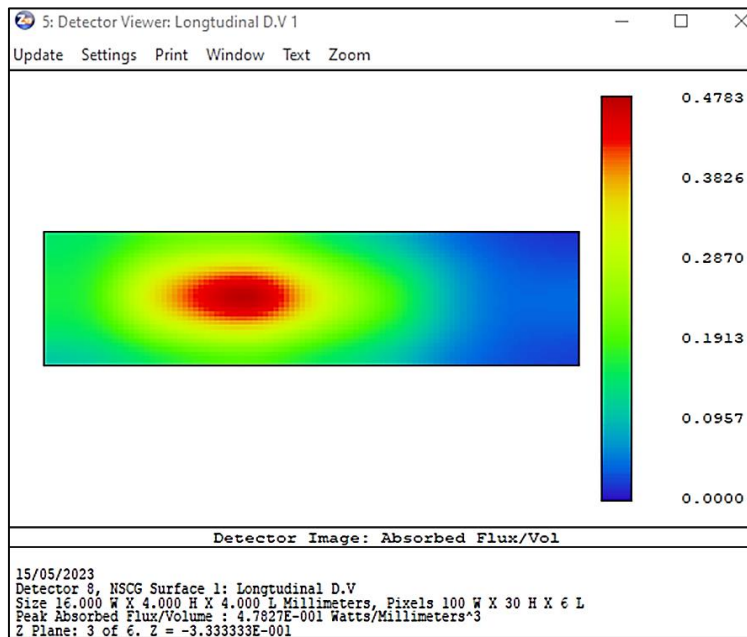


الشكل (20.III): صورة توضح قيمة وتوزيع الأشعة عند مخرج الدليل الموجي.

نلاحظ أنّ هناك انخفاضاً في قيمة الاستطاعة: من 50.17W إلى 47.75W، ومنه نستطيع حساب كفاءة نقل الأشعة للدليل الموجي وذلك بالعلاقة: $(47.75 \div 50.17 = 95\%)$. يرجع هذا التناقص في قيمة الاستطاعة إلى الضياعات داخل الدليل الموجي (الامتصاص، الانعكاس الداخلي غير التام) [37].

3.5.III قياس الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال (الكاشف الثالث)

لقياس استطاعة طاقة الضّخ الممتصة من طرف الوسط الفعال (قضيب Ce:Nd:YAG) ومعرفة طريقة توزيعها، يُستعمل كاشف حجمي (نقاط حجمية والتي تسمى الفوكسل)، كما يوضح الشكل (21.III).



الشكل (21.III): صورة توضح توزيع الاستطاعة الممتصة من طرف القضيب (الوسط الفعال Ce:Nd:YAG).

لا يُمكن معرفة قيمة الاستطاعة الممتصة من طرف القضيب مباشرة من خلال الشكل (21.III)، وهذا يرجع لخصائص الكواشف. فالكواشف المسطحة تعطي نتيجة الاستطاعة مباشرة، أما الكاشف المستعمل في هذه الحالة على شكل ثلاثي الأبعاد (كاشف حجمي) فهو لا يعطي النتيجة مباشرة، لذا نستعين ببرنامج Excel®. نقوم بتخزين بيانات الشكل (21.III) على شكل نصّ في ملف يُفتح بعد ذلك في صفحة في برنامج Excel®. نقوم بجمع الاستطاعة الممتصة في جميع نقاط الوسط الفعال و المُقاسة بواسطة الكاشف الحجمي حيث تم الحصول على استطاعة ممتصة تقدر بـ: 31.3W، كما هو موضح في الشكل (22.III).

17996	7,28E+00	1,93E+00	1,67E+00	1,47E-02	0,00E+00	0,00E+00
17997	7,44E+00	1,93E+00	1,67E+00	1,39E-02	0,00E+00	0,00E+00
17998	7,60E+00	1,93E+00	1,67E+00	1,38E-02	0,00E+00	0,00E+00
17999	7,76E+00	1,93E+00	1,67E+00	1,55E-02	0,00E+00	0,00E+00
18000	7,92E+00	1,93E+00	1,67E+00	1,37E-02	0,00E+00	0,00E+00
			3,75E-13	1,96E+03	3,13E+01	2,20E+03

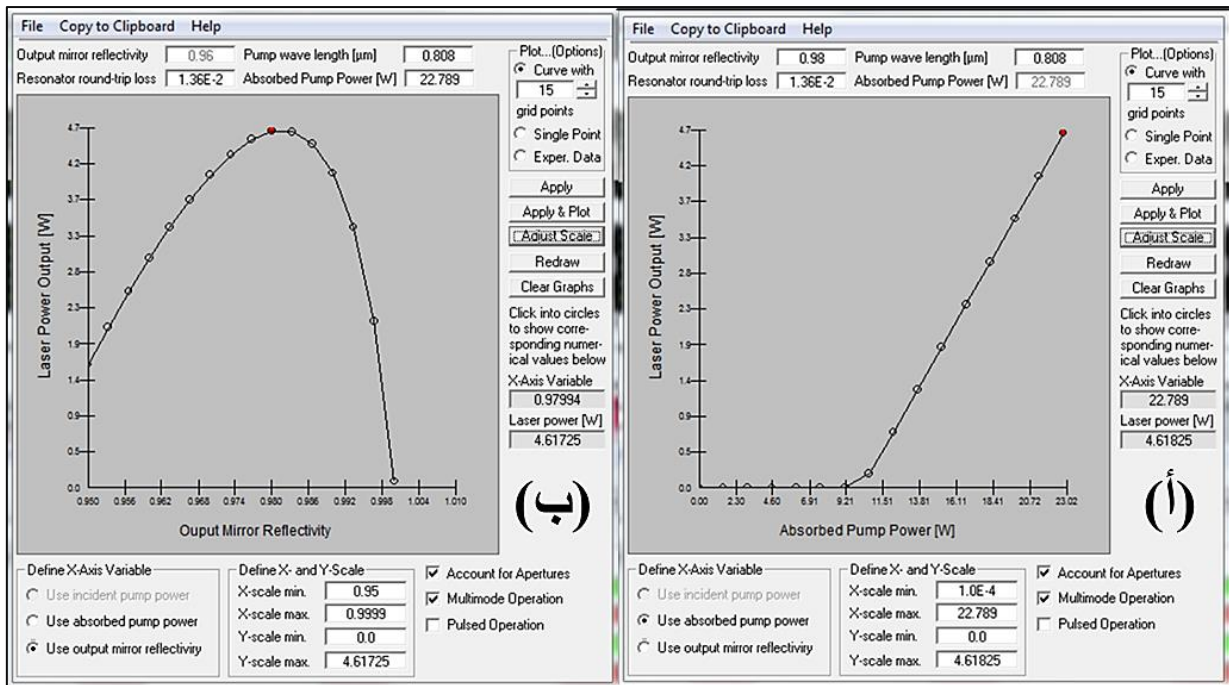
الشكل (22.III): صورة توضح نتيجة الاستطاعة الممتصة لـ Ce:Nd:YAG باستخدام برنامج Excel®.

نلاحظ، من خلال نتائج المحاكاة، أن قيمة الاستطاعة الممتصة للوسط الفعال لـ (Nd:YAG) عند تطعيمها بأيونات السيريوم (Ce^{+3}) تحسنت إلى حوالي الضعف من خلال العلاقة ($31.3 \div 16.4 = 1.91$). نقوم الآن بحساب الاستطاعة الليزرية المنبعثة باستعمال برنامج LASCAD™ لكلٍ من المنظومتين ثم المقارنة بين النتائج.

6.III نتائج المحاكاة العددية باستعمال برنامج LASCAD™

1.6.III بالنسبة لـ Nd:YAG

تمت محاكاة المنظومة الليزرية بواسطة برنامج Zemax® وتحديد قيمة الامتصاص من طرف الوسط الفعال Nd:YAG بمساعدة برنامج Excel®. قمنا بمحاكاة هذه النتيجة ببرنامج LASCAD™ كما هو موضح في الشكل (23.III)، الذي بدوره يقيس استطاعة الليزر المنبعث والتي بلغت 4.618W بالنسبة لـ Nd:YAG.



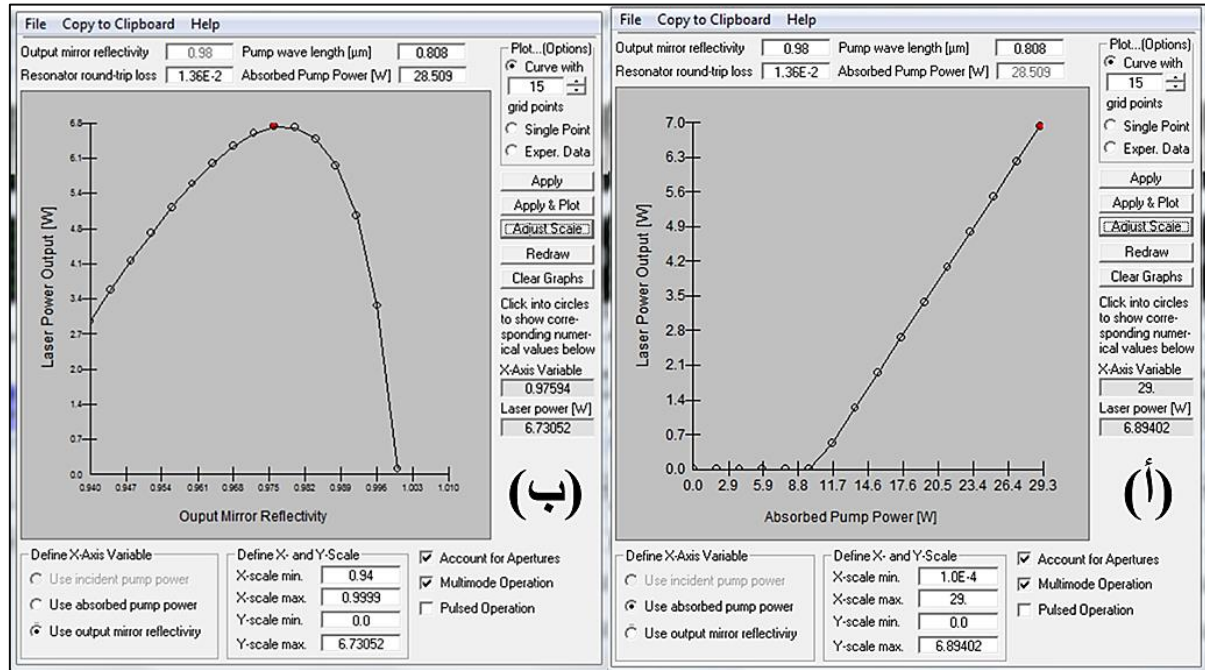
الشكل (23.III): (أ) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الامتصاص للضخ لـ (Nd:YAG) باستخدام برنامج LASCAD™. (ب) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة انعكاسية المرآة.

تبيّن النتائج المتحصّل عليها باستخدام برنامج LASCAD™ في الشكل (23.III) (أ) تزايد طاقة انبعاث الليزر بزيادة الطاقة الممتصة للضخ. فمن أجل معامل انعكاسية المرآة الأمامية مساوية لـ 98% وقطر الوسط الليزري $D=4\text{mm}$ و طوله $L=16\text{mm}$. تكون استطاعة عتبة الضخ 9.21W، بينما يكون ميل المنحنى والذي يمثل كفاءة الانحدار (slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعال لـ Nd:YAG إلى ليزر شمسي هو: $(\tan \alpha = 4.618 \div (22.789 - 9.21) = 0.34)$.

تبيّن النتائج المتحصّل عليها في الشكل (23.III) (ب) تغيّر طاقة خرّج الليزر بدلالة انعكاسية المرآة الامامية للتجويف الرنيني. إذ تصل طاقة خرّج الليزر قيمتها القصوى عند انعكاسية المرآة الواقعة بين $R=98\%$ و $R=99.9\%$. فزيادة انعكاسية المرآة إلى قيمة معينة، يؤدي ذلك إلى التسخين و ينتج عنه انتقالات غير مشعة على حساب الانتقالات المشعة. ممّا يؤثر سلبيًا على طاقة خرّج الليزر.

2.6.III Ce:Nd:YAG بالنسبة لـ

تمت محاكاة المنظومة الليزرية بواسطة برنامج Zemax[®] وتحديد قيمة الامتصاص من طرف الوسط الفعّال Ce:Nd:YAG بمساعدة برنامج Excel[®]. قمنا بمحاكاة هذه النتيجة ببرنامج LASCAD[™] كما يوضح الشكل (24.III)، الذي بدوره يقيس استطاعة الليزر المنبعث و هي: 6.894W بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG.



الشكل (24.III): (أ) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الامتصاص للضخ لـ (Ce:Nd:YAG) باستخدام برنامج LASCAD[™]. (ب) صورة توضح طاقة الليزر المنبعث بدلالة انعكاسية المرآة.

بنفس الكيفية للوسط الفعّال Nd:YAG (القياسات مثل الشكل السابق (23.III))، نجد في الشكل (24.III) (أ) أن استطاعة عتبة الضخ تبلغ 9.80W، بينما يكون ميل المنحنى والذي يمثل كفاءة الانحدار (slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعّال Ce:Nd:YAG إلى ليزر شمسي هو: $\tan \alpha = 6.894 / (29.0 - 9.80) = 0.36$. كما يبين (24.III) (ب) تغيير طاقة خرج الليزر بدلالة انعكاسية المرآة الامامية للتجويف الرنيني، إذ تصل طاقة خرج الليزر قيمتها القصوى عند انعكاسية المرآة $R=98\%$. فزيادة انعكاسية المرآة إلى تلك القيمة، يؤدي ذلك إلى التسخين و ينتج عنه انتقالات غير مشعة على حساب الانتقالات المشعة. مما يؤثر سلباً على طاقة خرج الليزر.

7.III مناقشة النتائج

انطلاقاً من المعادلة (1-III)، بإشعاع شمسي ساقط على الارض تبلغ شدته $950W/m^2$ [37] لمنظومة الليزر الشمسي ذات الوسط الفعّال Nd:YAG بمركز على شكل قطع مكافئ مساحته $0.20m^2$. وذلك باحتساب نسب كل من انعكاسية المرآة (95%) و التداخل في طيف الامتصاص لهاته المادة (16%) مع طيف الانبعاث الشمسي [4]، تحصلنا على استطاعة منبع قدرها 29.85W.

تمكناً، باستخدام برنامج Zemax[®] للمحاكاة العددية، من قياس الاستطاعة عند بؤرة التركيز بوضع كاشف سطحي أول في البؤرة، فتحصلنا على 26.44W بتوزيع غاوسي كما يظهر الشكل (14.III). و هذا بنسبة ضياع للأشعة المركزة عند البؤرة مقدرة بـ 11.4%. استعمل دليل موجي لنقل الاضواء المركزة، تم قياس الاشعة الضوئية عند مخرجه بوضع بوضع كاشف سطحي ثاني تتناسب أبعاده مع مخرج الدليل

الموجي، فتحصلنا على استطاعة ضوئية تقدر بـ $25.17W$ بتوزيع غاوسي كما يوضحه الشكل (15.III). وذلك بضياعات داخل الدليل الموجي قدرها 4.8% بسبب الامتصاص والانعكاس الداخلي للأشعة.

تم قياس الاستطاعة الضوئية الممتصة من طرف الوسط الفعال لقضيب Nd:YAG عبر وضع كاشفين حجميين (طولي وعرضي) حول هذا الوسط لحساب الاستطاعة في كل نقطة حجمية من نقاطه ومعرفة طريقة توزيعها، كما يُظهر الشكل (16.III) الذي تم تحويله إلى نصّ عددي لتعذر اخراج نتيجة الاستطاعة الكلية مباشرة. وبالاستعانة ببرنامج Excel® (الذي يُعطي قيمة الاستطاعة المسجلة من طرف الكاشف ثم نقوم بجمعها لنحصل على الاستطاعة الكلية) تحصلنا على $16.4W$ بنسبة ضياع عبر المنظومة قدرها 45.1% ، كما يظهر في الشكل (17.III). قصد تحسين هاته الاستطاعة الكلية الممتصة، نلجأ لتقنية التطعيم المضاعف للوسط الفعال لـ Nd:YAG بأيونات الـ (Ce^{+3}) للحصول على مادة جديدة (Ce:Nd:YAG) ذات خصائص مُحسنة تمت دراستها تحت نفس الشروط للمادة الأولية.

أما بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG، فتمّ حساب استطاعة المنبع بالمعادلة (2-III) بعد احتساب النسبة الجديدة المحسنة (32%) لتداخل طيف امتصاص هذا الوسط الفعال مع طيف الانبعاث الشمسي [13]، فتحصلنا على قيمة $56.70W$. بنفس الخطوات السابقة المُتبعة في محاكاة الوسط الفعال (Nd:YAG)، تم الحصول على الاستطاعة الممتصة للوسط الفعال (Ce:Nd:YAG) بمقدار $31.3W$ بضيايع عبر المنظومة نسبته 44.8% . تمّ تحسين الاستطاعة الكلية الممتصة من طرف الوسط الفعال بقدر $(1.91 = (31.3 \div 16.4))$ مرة، أي حوالي ضعف الاستطاعة الممتصة للوسط الفعال (Nd:YAG). تم حساب الاستطاعة الليزرية المنبعثة ببرنامج LASCAD™، وهذا بعد عدّة عمليات ضبط لنظام المرايا (لاستخدام افضل نسبة: وهي 98%) وللأبعاد التي بين الوسط الفعال والمرنان، فتحصلنا على قيمة $4.618W$ بالنسبة لـ Nd:YAG و $6.894W$ لـ Ce:Nd:YAG، أي بتحسين في استطاعة الليزر المنبعث قدره $(1.5 = (6.894 \div 4.618))$ مرة من السابق. و أمّا كفاءة التجميع فنجدها $(23.09W/m^2 = (4.618W \div 0.20m^2))$ بالنسبة لـ Nd:YAG، و $(34.47W/m^2 = (6.894W \div 0.20m^2))$ بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG أي بتحسين قدره $(1.5 = (34.47 \div 23.09))$ مرة. كفاءة التحويل الشمسي-الليزري هي $(2.4\% = (4.618 \div 190))$ بالنسبة لـ Nd:YAG، و $(3.6\% = (4.618 \div 190))$ بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG أي بتحسين قدره $(1.5 = (3.6 \div 2.4))$ مرة. كفاءة الميل (الانحدار) لتحويل الاستطاعة الشمسية الممتصة من طرف الوسط الفعال إلى ليزر شمسي نجدها $(\tan \alpha = 0.34)$ بالنسبة لـ Nd:YAG، و $(\tan \alpha = 0.36)$ بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG أي بتحسين قدره $(1.06 = (0.36 \div 0.34))$ مرة.

8.III خاتمة

تمّ، في هذا الفصل، القيام بمحاكاة عددية بواسطة البرنامجين Zemax® و LASCAD™ بهدف تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي لـ Nd:YAG. أولاً، تمت دراسة أداء منظومة الليزر الشمسي بالوسط الفعال Nd:YAG، ثم بالوسط الفعال Ce:Nd:YAG (أي قبل ثم بعد تطبيق التطعيم المضاعف بالسيريوم).

أظهرت المحاكاة العددية أنّ الوسط الفعال Ce:Nd:YAG يُحقّق استطاعة مُمتصة أكبر بـ 1.91 مرة (أي حوالي الضعف) و استطاعة ليزر منبعث أكبر بـ 1.5 مرة، كما يزيد من كفاءة التحويل الشمسي-الليزري بـ 1.5 مرة، و من كفاءة الميل (الانحدار) لتحويل الاستطاعة الشمسية الممتصة إلى ليزر شمسي بـ 1.06 مرة و من كفاءة التجميع بـ 1.5 مرة مقارنةً بالمنظومة التقليدية بـ Nd:YAG، تحت نفس الشروط.

يُستنتج، من خلال النتائج المُتحصل عليها، أنّ تقنية التطعيم المضاعف بالسيريوم للوسط الفعال Nd:YAG تؤدي إلى تحسينات مُعتبرة في كفاءة منظومة هذا الليزر الشمسي.

الخاتمة العامّة

الخاتمة العامة

تم استغلال ضوء الليزر في مجموعة واسعة من التطبيقات الطبية، العسكرية، الاتصالات، معالجة المواد ذات درجة حرارة عالية... الخ، وذلك بفضل خصائصه المميزة كشعاع رفيع، مترابط (متناسك) و عالي السطوع. يتم الحصول على أشعة الليزر عن طريق ضخ الوسط الفعال باستخدام مصادر إضاءة، ومن بينها الشمس. هذه الأخيرة تُعدّ مصدرًا للطاقة المتجددة ويسمى الليزر الناتج عنها بالليزر الشمسي. تعتمد فكرة الحصول على الليزر الشمسي على تجميع، تركيز وتوجيه الإشعاع الشمسي لتحفيز الوسط الفعال وإثارة ذراته.

رغم الخصائص الجيدة لـ Nd:YAG كوسط فعال لإنتاج الليزر الشمسي، إلا أن مدى تطابق طيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي ضعيف نسبيًا (تداخل بنسبة 16% [4]). وبالتالي يبقى استغلال طاقة الإشعاع الشمسي ضعيفًا واستطاعة الليزر المنبعث صغيرة نسبيًا. الهدف من هذا العمل هو تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي لـ Nd:YAG باستخدام تقنية التطعيم المضاعف بالسيريوم، حيث تمت المحاكاة العددية بواسطة البرنامجين Zemax® و LASCAD™ لدراسة أداء منظومة الليزر الشمسي قبل (حيث الوسط الفعال هو Nd:YAG) وبعده تطبيق التطعيم المضاعف (حيث الوسط الفعال هو Ce:Nd:YAG).

المحاكاة العددية كشفت عن استطاعة مُمتصة من طرف الوسط الفعال قدرها 16.4W و استطاعة ليزر مُنبعث قدرها 4.618W بالنسبة لـ Nd:YAG. هذا يعني أن له كفاءة تحويل شمسي-ليزري قدرها 2.4%، كفاءة انحدار (ميل) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة إلى ليزر شمسي قدرها $(\tan \alpha = 0.34)$ وكفاءة تجميع قدرها 23.09 W/m^2 . أما بالنسبة لـ Ce:Nd:YAG، فتحصّلنا على استطاعة مُمتصة قدرها 56.70W واستطاعة ليزر مُنبعث قدرها 6.894W، وبالتالي فله كفاءة تحويل شمسي-ليزري قدرها 3.6%، كفاءة انحدار (ميل) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة إلى ليزر شمسي قدرها $(\tan \alpha = 0.36)$ وكفاءة تجميع قدرها 34.47 W/m^2 .

هذه النتائج أظهرت أن استخدام التطعيم المضاعف بالسيريوم (الوسط الفعال Ce:Nd:YAG) يؤدي إلى تحسين مُعتبر في جميع المتغيرات المدروسة؛ حيث يُحقّق قيمة استطاعة مُمتصة أكبر بـ 1.91 مرّة (أي حوالي الضعف) وقيمة استطاعة ليزر مُنبعث أكبر بـ 1.5 مرّة، كما يزيد من كفاءة الميل (الانحدار) لتحويل الاستطاعة الشمسية الممتصة من طرف الوسط الفعال إلى ليزر شمسي بـ 1.06 مرّة، من كفاءة التجميع بـ 1.5 مرّة و من كفاءة التحويل الشمسي-الليزري بـ 1.5 مرّة مقارنةً بالمنظومة التقليدية لـ Nd:YAG تحت نفس الشروط، وهذا بفضل خصائصه المُحسّنة.

خلاصة و من خلال النتائج المتحققة من المحاكاة العددية، يمكن الاستدلال على أن التطعيم المضاعف بالسيريوم (الوسط الفعال Ce:Nd:YAG) تُعدّ تقنية فعّالة لتحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي Nd:YAG. وبالتالي، يمكن استخدامها لتطوير منظومات ليزر شمسي أكثر قدرة وكفاءة في مجالات مختلفة؛ كالتصوير الطبي، الصناعة، البحث العلمي و تطبيقات الأنظمة الفضائية.

رغم كلّ التحسينات المذكورة أعلاه، يجب الإشارة إلى أنّه ما زال هناك حاجة لمزيد من البحوث والتجارب لتحسين فهمنا لتأثير التطعيم المضاعف بالسيريوم على منظومة الليزر الشمسي وتحسين تقنيات التصنيع المرتبطة بها. استمرار الأبحاث والدراسات في هذا المجال، سيُسهم في دفع تقنية التطعيم المضاعف بالسيريوم إلى مستويات جديدة وتوسيع نطاق تطبيقاتها المحتملة. يُمكن الوصول للمزيد من التحسينات في أداء منظومة الليزر الشمسي التي درسناها بعدة أفكار، نقترح منها:

تحسين هذه المنظومة من خلال البحث عن موادّ جديدة لها خصائص امتصاص عالية و مقاومة كبيرة للحرارة قصد الحصول على امتصاص شمسي أعلى، وبالتالي كفاءة تحويل شمسي-ليزري أكبر و بحزمة ذات شكل غاوسي لاستغلالها الأمثل في التطبيقات عالية الدقة.

المراجع

المراجع

- [1] C. G. Young, "A Sun-Pumped cw One-Watt Laser," *Appl. Opt.*, vol. 5, no. 6, pp. 993–997 (1966).
- [2] D. Liang and J. Almeida, "Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser," *Opt. Express*, vol. 19, no. 27, pp. 26399–26405 (2011).
- [3] Z. Guan, C. Zhao, J. Li, D. He, and H. Zhang, "32.1 W/m² continuous wave solar-pumped laser with a bonding Nd:YAG/YAG rod and a Fresnel lens," *Opt. Laser Technol.*, vol. 107, pp. 158–161 (2018).
- [4] Z. Bin, Z. Changming, and H. Jianwei, "The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers," *Acta Opt. Sin.*, vol. 27, no. 10, p.1797 (2007).
- [5] D. Liang, C. R. Vistas, B. D. Tibúrcio, and J. Almeida, "Solar-pumped Cr:Nd:YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, pp. 75–79 (2018).
- [6] C. R. Vistas, D. Liang, D. Garcia, J. Almeida, B. D. Tiburcio, and E. Guillot, "Ce: Nd: YAG continuous-wave solar-pumped laser," *Optik (Stuttg.)*, vol. 207, p. 163795 (2020).
- [7] T. Yabe *et al.*, "High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 26, p. 261120 (2007).
- [8] Z. J. Kiss and R. C. Duncan, "CROSS-PUMPED Cr³⁺–Nd³⁺:YAG LASER SYSTEM," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 5, no. 10, pp. 200–202 (2004).
- [9] J. Mares, B. Jacquier, C. Pedrini, and G. Boulon, "Energy transfer mechanisms between Ce³⁺ and Nd³⁺ in YAG: Nd, Ce at low temperature," *Rev. Phys. appliquée*, vol. 22, no. 2, pp. 145–152 (1987).
- [10] M. Yamaga, Y. Oda, H. Uno, K. Hasegawa, H. Ito, and S. Mizuno, "Energy transfer from Ce to Nd in Y₃Al₅O₁₂ ceramics," *Phys. status solidi c*, vol. 9, no.12, pp. 2300–2303 (2012).
- [11] J. X. Meng, J. Q. Li, Z. P. Shi, and K. W. Cheah, "Efficient energy transfer for Ce to Nd in Nd/Ce codoped yttrium aluminum garnet," *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, no. 22, p. 221908 (2008).

- [12] J. Mareš, "Energy transfer in YAlG:Nd codoped with Ce," *Czechoslov. J. Phys. B*, vol. 35, no. 8, pp. 883–891 (1985).
- [13] S. Payziyev *et al.*, "Luminescence sensitization properties of Ce: Nd: YAG materials for solar pumped lasers," *Opt. Commun.*, vol. 499, p.127283 (2021).
- [14] C. R. Vistas *et al.*, "Ce: Nd: YAG side-pumped solar laser," *J. Photonics Energy*, vol. 11, no. 1, p. 18001 (2021).
- [15] D. Garcia *et al.*, "Ce: Nd: YAG solar laser with 4.5% solar-to-laser conversion efficiency," *Energies*, vol. 15, no. 14, p. 5292 (2022).
- [16] D. Liang, J. Almeida, D. Garcia, B. D. Tibúrcio, E. Guillot, and C. R. Vistas, "Simultaneous solar laser emissions from three Nd: YAG rods within a single pump cavity," *Sol. Energy*, vol. 199, pp. 192–197 (2020).
- [17] Z. Cai, C. Zhao, Z. Zhao, J. Zhang, Z. Zhang, and H. Zhang, "Efficient 38.8 W/m² solar pumped laser with a Ce:Nd:YAG crystal and a Fresnel lens.," *Opt. Express*, vol. 31, no. 2, pp. 1340–1353 (2023).
- [18] S. C. Singh, H. B. Zeng, C. Guo, and W. Cai, "Nanomaterials: processing and characterization with lasers." John Wiley & Sons, USA, p.810 (2012).
- [19] Y. A.-F. Abdel-Hadi, "Development of optical concentrator systems for directly solar pumped laser systems." Berlin, Techn. Univ., Diss., (2006).
- [20] سعود بن عبد الحميد اللحياني، "الليزر وتطبيقاته"، كتاب رقمي صادر عن كلية العلوم، منشورات جامعة أم القرى، المملكة العربية السعودية، ص 7-9 (2008).
- [21] محمد الكوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، كتاب رقمي صادر عن كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، سوريا، ص 15-306 (2006).
- [22] محمد يوسف الشيخ، "دراسة اللوحات الفنية باستخدام تقنية أطياف البلازما المستحثة بالليزر"، مذكرة ماجستير، جامعة السودان، السودان، ص 11-32 (2017).
- [23] K. Wegner and S. E. Pratsinis, "Flame synthesis of nanoparticles," *Chim. Oggi*, vol. 22, no. 9, pp. 27–29 (2004).
- [24] عدي عطا حمادي، "أساسيات الليزر وتطبيقاته لطلبة الدبلوم الفني في الاتصالات"، كتاب صادر عن دار الكندي للنشر والتوزيع، عمان، الأردن، ص 1-84 (2004).
- [25] W. Koechner and M. Bass, "Solid-State Lasers: A Graduate Text (Advanced Texts in Physics).", Springer Science & Business Media, USA, p. 409 (2006).

- [26] T. H. Maiman, "Stimulated optical emission in fluorescent solids. I. Theoretical considerations," *Physical Review*, vol. 123, no. 4, pp. 1145–1150 (1961).
- [27] Z. J. Kiss, H. R. Lewis, and R. C. Duncan, "Sun pumped continuous optical maser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 93–94 (1963),
- [28] إكرام زيتوني، "نمذجة ليزر الثوليوم في الزجاج"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر، ص 5-53 (2014).
- [29] فاروق عبودي قيصر، "الليزرات"، كتاب صادر عن دار الكتب للطباعة والنشر، الموصل، العراق، ص 68-70، (1984).
- [30] T. H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe, and H. Kuboyama, "120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and an Nd: YAG rod," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 13, pp. 2670–2672 (2012).
- [31] Z. Guan *et al.*, "Low threshold and high efficiency solar-pumped laser with Fresnel lens and a grooved Nd: YAG rod," in *High-Power Lasers and Applications VIII*, vol. 10016, pp. 16–24 (2016).
- [32] P. Xu *et al.*, "High-efficiency solar-pumped laser with a grooved Nd:YAG rod," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 18, pp. 3941–3944 (2014).
- [33] Z. Jagoo, "Tracking solar concentrators: a low budget solution." Springer Science & Business Media, Dordrecht, Holland, p. 99 (2013).
- [34] R. T. Schneider, U. H. Kurzweg, J. D. Cox, and N. H. Weinstein, "Research on solar pumped liquid lasers," pp.1–31 (1983).
- [35] R. J. Insuik and W. H. Christiansen, "Blackbody-pumped CO₂ laser experiment," *AIAA J.*, vol. 22, no. 9, pp. 1271–1274 (1984).
- [36] R. J. De Young and W. R. Weaver, "Low-threshold solar-pumped laser using C₂F₅I," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 7, pp. 369–370 (1986).
- [37] W. T. Silfvast, "Laser fundamentals.", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 642 (2004).
- [38] P. Gale, "Estimating Laser Diode Lifetimes and Activation Energy," *ILX Light. Appl. Noter#33*, pp. 1–2 (2008), [Document Available Online at]: https://assets.newport.com/webDocumentsEN/images/AN33_Laser_Diode_Activation_IX.pdf. (تاريخ التصفح: 15/04/2023).
- [39] نور الدين حمروني، "ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين"، أطروحة دكتوراه، جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي، الجزائر، ص 1-169 (2021).

- [40] M. Lando *et al.*, "Solar-pumped solid state laser program," in *10th Meeting on Optical Engineering in Israel*, vol. 3110, pp. 196–201 (1997).
- [41] M. Vasile and C. A. Maddock, "Design of a formation of solar pumped lasers for asteroid deflection," *Adv. Sp. Res.*, vol. 50, no. 7, pp. 891–905 (2012).
- [42] C. Balakishan, N. Sandeep, M. V. Aware, and P. Bauer, "Design and implementation of three-level DC-DC converter with golden section search based MPPT for the photovoltaic applications," *Advances in Power Electronics*, vol. 2015 (2015).
- [43] Y. Takashi, O. Tomomasa, D. T. Hung, K. Hiroki, N. Junichi, and O. Kouta, "Demonstration of solar-pumped laser-induced magnesium production from magnesium oxide," *Magnes. Technol.*, pp. 55–58 (2016).
- [44] T. Yabe, K. Yoshida, and S. Uchida, "Demonstrated fossil-fuel-free energy cycle using magnesium and laser," in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2007, vol. 2007, no. 1, p. M1103 (2007).
- [45] J. Almeida *et al.*, "40 W Continuous Wave Ce:Nd:YAG Solar Laser through a Fused Silica Light Guide," *Energies*, vol. 15, no. 11. (2022).
- [46] سعود يوسف عياش، "تكنولوجيا الطاقة البديلة"، كتاب صادر عن عالم المعرفة - سلسلة كتب يُصدرها المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الكويت، ص 156-170 (1978).
- [47] D. A. Atwood, "*The Rare Earth Elements: Fundamentals and Applications*." John Wiley & Sons, USA, p. 624 (2013).
- [48] P. Villars and K. Cenzual, Eds., "YAlO₃; YAP (YAlO₃ ht) Crystal Structure: Datasheet from "PAULING FILE Multinaries Edition – 2022" in Springer Materials (2022). [Available Online at]: https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1924025. (تاريخ التصفح: 11/03/2023).
- [49] S. M. Sim, K. A. Keller, and T. I. Mah, "Phase formation in yttrium aluminum garnet powders synthesized by chemical methods," *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no.3, pp. 713–717 (2000).
- [50] P. Villars and K. Cenzual, Eds., "Y₄Al₂O₉; YAM (Y₄Al₂O₉ rt) Crystal Structure: Datasheet from "PAULING FILE Multinaries Edition – 2022" in Springer Materials (2022). [Available Online at]: https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1924026. (تاريخ التصفح: 11/03/2023).

- [51] "Gem Reference Guide", Gemological Institute of America (GIA), USA, p. 270 (1998). ISBN 0-87311-019-6.
- [52] R. M. Hazen, "*The diamond makers.*", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 260 (1999).
- [53] D. Franta and M.-G. Mureşan, "Wide spectral range optical characterization of yttrium aluminum garnet (YAG) single crystal by the universal dispersion model," *Opt. Mater. Express*, vol. 11, no. 12, pp. 3930–3945 (2021).
- [54] M. A. Hughes, "Modified chalcogenide glasses for optical device applications", Ph.D Thesis, University of Salford, United Kingdom, p.226 (2007).
- [55] B. T. Do and A. V Smith, "Bulk optical damage thresholds for doped and undoped, crystalline and ceramic yttrium aluminum garnet.," *Applied Optics*, vol. 48, no. 18, pp. 3509–3514 (2009).
- [56] F. Trombe, "Solar furnaces and their applications," *Sol. Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 9–15 (1957).
- [57] A. Beggas, "Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares: Application Amplificateur Optique." Thèse de Magister, Centre Universitaire d'El-oued, Algérie, p. 162 (2010).
- [58] D. Liang, J. Almeida, C. Vistas, B. Tibúrcio, and D. Garcia, "*Solar-Pumped Lasers.*" Cham: Springer International Publishing, Switzerland, p. 312 (2023).
- [59] J. E. Geusic, H. M. Marcos, and L. Van Uitert, "Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 182–184 (1964).
- [60] S. Berwal, N. Khatri, and D. Kim, "A review on design modalities of solar-pumped solid-state laser," *Appl. Surf. Sci. Adv.*, vol. 12, p. 100348 (2022).
- [61] T. Kato *et al.*, "Effect of Cr content on the output of a solar-pumped laser employing a Cr-doped Nd:YAG ceramic laser medium operating in sunlight," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 6, p. 62007 (2019).
- [62] H. Costa *et al.*, "Quasi-Gaussian multibeam solar laser station for a megawatt solar furnace," *J. Sol. Energy Res. Updat.*, vol. 8, pp. 11–20 (2021).
- [63] C. R. Vistas, D. Liang, and J. Almeida, "Solar-pumped TEM00 mode laser simple design with a grooved Nd:YAG rod," *Sol. Energy*, vol. 122, pp. 1325–1333 (2015).

- [64] R. De Matos, "High Efficiency Solar Pumped Laser Through a Ring Array Concentrator", Master Dissertation, NOVA University of Lisbon, Portugal, p.69 (2019).
- [65] T. H. Dinh, T. Ohkubo, and T. Yabe, "Development of solar concentrators for high-power solar-pumped lasers," *Applied Optics*, vol. 53, no. 12, pp. 2711–2719 (2014).
- [66] "Nd:Ce:YAG.", Technical report, *LASER COMPONENTS®*, United Kingdom, p.03 (2023). [Document Available Online at]: https://www.lasercomponents.com/de/?embedded=1&file=fileadmin/user_upload/home/Datasheets/diverse-laser-optics/laser-rods-crystals/nd-ceyag.pdf&no_cache=1. (تاريخ التصفح: 22/04/2023).
- [67] J. X. Meng, J. Q. Li, Z. P. Shi, and K. W. Cheah, "Efficient energy transfer for Ce to Nd in Nd/Ce codoped yttrium aluminum garnet," *Appl. Phys. Lett.*, vol.93, no. 22, p. 221908 (2008).
- [68] P. Samuel, T. Yanagitani, H. Yagi, H. Nakao, K. I. Ueda, and S. M. Babu, "Efficient energy transfer between Ce^{3+} and Nd^{3+} in cerium codoped Nd: YAG laser quality transparent ceramics," *J. Alloys Compd.*, vol. 507, no. 2, pp. 475–478 (2010).
- [69] Y. Li, S. Zhou, H. Lin, X. Hou, and W. Li, "Intense 1064nm emission by the efficient energy transfer from Ce^{3+} to Nd^{3+} in Ce/Nd co-doped YAG transparent ceramics," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 32, no. 9, pp. 1223–1226, (2010).
- [70] Y. Guo, J. Huang, G. Ke, Y. Ma, J. Quan, and G. Yi, "Growth and optical properties of the Nd,Ce:YAG laser crystal," *J. Lumin.*, vol.236, p. 118134 (2021).
- [71] "ASTM G173-03: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface," Technical report, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA, p. 21 (2012).
- [72] Y. Tai, G. Zheng, H. Wang, and J. Bai, "Near-infrared quantum cutting of Ce^{3+} – Nd^{3+} co-doped $Y_3Al_5O_{12}$ crystal for crystalline silicon solar cells," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 303, pp. 80–85 (2015).
- [73] S. Nishiura, S. Tanabe, K. Fujioka, and Y. Fujimoto, "Properties of transparent Ce:YAG ceramic phosphors for white LED," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 33, no.5, pp. 688–691 (2011).

- [74] R. T. Wegh, H. Donker, K. D. Oskam, and A. Meijerink, "Visible Quantum Cutting in $\text{LiGdF}_4\text{:Eu}^{3+}$ Through Down-conversion," *Science* (80)., vol. 283, no. 5402, pp. 663–666 (1999).
- [75] X. Liu *et al.*, "Broadband conversion of visible light to near-infrared emission by Ce^{3+} , Yb^{3+} -codoped yttrium aluminum garnet," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 22, pp. 3565–3567 (2009).
- [76] R. ZEMAX, "Zemax[®] user's manual," *Radiant ZEMAX LLC (RZ)*, Kirkland, p.805 (2011).
- [77] S. Mehellou, "Pompage optique des lasers par faisceau solaire." Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie, p. 171 (2018).
- [78] K. Altmann, "LASCAD[™] - The Laser Engineering Tool. LAS-CAD GmbH." Technical report, Munich, Germany, p. 46 (2016).
- [79] A. G. Fox and T. Li, "Resonant modes in a maser interferometer," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 40, no. 2, pp. 453–488 (1961).
- [80] B. Gazolin, "Study and Simulation of Solar Pumping for Nd: YAG Laser Using ZEMAX Program," *Tishreen Univ. Journal-Basic Sci. Ser.*, vol. 44, no.3, pp. 133–152 (2022).

ملخص

يهدف تحسين مردودية أنظمة الليزر الشمسي إلى الحصول على أكبر استطاعة ليزر مُنبعث انطلاقًا من الطاقة الشمسية المركزة المستعملة في تحفيز الوسط الليزري (الوسط الفعال)، مما يستوجب تحسين أداء منظومة تجميع وتركيز الطاقة الشمسية وكذلك منظومة توليد أشعة الليزر (رأس الليزر).

تُرَكِّزت عملية التحسين، في هذه المذكرة، على تطوير أداء الوسط الفعال Nd:YAG نظرًا لنسبة تطابق طيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي الضعيفة نسبيًا، وذلك بالتطعيم المُضاعف لهاته المادة بأيونات السيريوم (Ce^{+3}). أظهرت نتائج المحاكاة بواسطة البرنامجين Zemax® و LASCAD™، أن استخدام التطعيم المُضاعف بالسيريوم يؤدي إلى تحسين مُعتبر في خصائص منظومة الليزر الشمسي Ce:Nd:YAG.

تم الحصول على استطاعة مُمتصة أكبر بحوالي الضِعف (1.91 مرة)، كفاءة تحويل شمسي-ليزري أكبر بـ 1.5 مرة، كفاءة الميل (الانحدار) لتحويل الاستطاعة الشمسية المُمتصة من طرف الوسط الفعال إلى ليزر شمسي أكبر بـ 1.06 مرة و كفاءة تجميع أكبر بـ 1.5 مرة من المنظومة التقليدية لـ Nd:YAG تحت نفس الشروط.

الكلمات المفتاحية: Ce:Nd:YAG، Nd:YAG، الليزر الشمسي، الوسط الفعال، التطعيم المُضاعف، طيف الامتصاص، طيف الانبعاث الشمسي.

Résumé

L'amélioration de l'efficacité des systèmes laser solaires vise à obtenir la plus grande puissance laser émise à partir de l'énergie solaire concentrée utilisée pour stimuler le milieu laser (le milieu actif), ce qui nécessite l'amélioration des performances du système de collecte et de concentration de l'énergie solaire, ainsi que le système de génération de faisceau laser (tête laser).

Dans ce mémoire, l'amélioration a porté sur le développement des performances du milieu actif Nd:YAG en raison du faible taux de chevauchement de son spectre d'absorption avec le spectre d'émission solaire, en le co-dopant avec des ions cérium (Ce^{+3}). Les résultats de simulation à l'aide des programmes Zemax® et LASCAD™ ont montré que l'utilisation du co-dopage avec le cérium conduit à une amélioration significative des caractéristiques du système laser solaire Ce:Nd:YAG.

La puissance absorbée est doublée (1.91 fois), l'efficacité de conversion solaire-laser est 1.5 fois plus, l'efficacité de pente pour la conversion de la puissance solaire absorbée (par le milieu actif) en un laser solaire est 1.06 fois plus, et l'efficacité de collecte est de 1.5 fois que celles du système conventionnel Nd:YAG sous les mêmes conditions.

Mots clés : Ce:Nd:YAG, Nd:YAG, Laser solaire, Milieu actif, Co-dopage, Spectre d'absorption, Spectre d'émission solaire.

Abstract

Improving the efficiency of solar laser systems aims to obtain the greatest laser power emitted from the concentrated solar energy used to stimulate the laser medium (the active medium), which necessitates improving the performance of the solar energy collection and concentration system, as well as the laser beam generation system (laser head).

In this thesis, the improvement focused on enhancing the performance of the active medium Nd:YAG due to the relatively weak overlap ratio of its absorption spectrum with the solar emission spectrum, by co-doping it with cerium ions (Ce^{+3}). Simulation results using Zemax® and LASCAD™ software have shown that the co-doping with cerium leads to a significant improvement in the characteristics of the Ce:Nd:YAG solar laser system.

The absorbed power is doubled (1.91 times greater), solar-to-laser conversion efficiency is 1.5 times greater, the slope efficiency of converting the absorbed solar power (by the active medium) into a solar laser is 1.06 times greater, and the collection efficiency is 1.5 times greater than the traditional Nd:YAG system under the same conditions.

Keywords: Ce:Nd:YAG, Nd:YAG, Solar laser, Active medium, Co-doping, Absorption spectrum, Solar emission spectrum.