



رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم: الفيزياء

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

تخصص: فيزياء اشعاع

من اعداد:

بن عبد الله الهام
بن علي منيرة

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

نوقشت يوم: 2023/06/07

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيسا

أستاذ تعليم عالي

جمال ضو

مناقشا

أستاذ تعليم عالي

رحومة فرحات

مؤطرا

أستاذ محاضر - أ.

محلو السعيد

أنجزت هذه المذكرة في مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية -LEVRES -

الموسم الجامعي: 2023/2022

الأهداء

عظم المراد فهان الطريق

فجاءت لذة الوصول . . . لتمحي مشقة السنين

أهدي ثمرة عملي إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب والحنان والتفاني إلى بسمة الحياة وسر الوجود، إلى

من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى قوتي حين ضعفي أمي الغالية *فاطمة*

إلى من كلفه الله بالهيبة والوقار إلى من علمني العطاء دون انتظار إلى من أحمل اسمه بكل اقتحار إلى الجدار

الذي استند عليه في تعبي إلى مروحي وقدوتي إلى من تدمع العين عند ذكره أرجو من الله أن يرحمه

ويسكنه فسيح جناته أبي الغالي *صالح*

إلى من أنقاسم معهم مر الحياة قبل حلوها وبكل الحب والوفاء وكلمات الشكر والثناء، إلى أغلى

ممتلكاتي وسندي في الحياة إخوتي الأعزاء *عثمان* نور الدين *الهاشمي*

إلى سكر أيامي وحلوها أخواتي ونزوجت أخي الغاليات *امباركة* نعيمة *حياة* سميرة *مفيدة* سهام *نجوى*

إلى من تعجز كلماتي وتنحي هامتي لعظيم عطائه شمس حياتي، إلى رفيق دربي وشريك حياتي وألمي

في الوجود خطيبي *عثمان*

إلى رفيقة دربي ومروح فؤادي صديقتي وزميلتي في العمل *منيرة*

إلى كل من قدم لنا يد العون من قريب أو من بعيد أخص بالذكر *هاجر بوتة*

إلهام بن عبد الله

الاهداء

الحمد لله الذي سدد وثمن هذه الخطوات من مسيرتنا العلمية بإنجاز ثمرة جهد
وكد لهذه المذكرة فما أجمل ان يجود المرء بأعلى ما لديه والاجمل ان هدي الغالي للأعلى
أهدى هذه الهدية الى: من كان سندنا دائما وأبدا إلى نبراس القلب إلى شمعة حياتنا إلى من تحملت قسوة الحياة إلى
من تحمّلني وانجبتني إلى من علمتني ان العطاء ليس له حدود أمي العالمة
"زينه".

الى من علمني ان الدنيا كفاح وسلاحها العلم والمعرفة إلى من سعى لأجل راحتي و نجاحي إلى أعز الناس ابي الغالي
"علي"

إلى من عشت معهم وتفاسمنا أحلى الأيام وأمرها إلى من هم أئمن وأجمل ما في هذه الدنيا
"أخواتي . وإخوتي"

وإلى رفيقة دربي التي تذوقت معها أجمل اللحظات إلى صديقة عمري

"إلهام بن عبد الله"

وإلى كل من كان لهم أثر على حياتي، وإلى كل من أحبهم قلبي

"زوجت اخي"

منيرة بن علي

شكر و عرفان

بسم الله والصلاة والسلام على أشرف خلق الله الرحمة المهداة للعالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

الحمد والشكر لله سبحانه وتعالى له الفضل وله المنة على توفيقه لإنجاز هذا العمل فإن
أصبنا فمن عنده وإن أخطأنا فمن أنفسنا

شيء جميل أن يسعى الإنسان إلى النجاح والتفوق فيحققه، لكن الأجل والأروع أن لا ينسى
من كان السبب في ذلك وعليه نتقدم بفائق عبارات الشكر والتقدير

إلى الأستاذ المشرف:

الدكتور محلو السعيد

على كافة المجهودات المبذولة والتوجيهات القيمة المقدمة لنا في سبيل
انجاز هذا العمل.

ولا يفوتنا أن نتقدم بالشكر الجزيل

لمدير مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية

السيد: رحومة فرحات

الذي أتاح لنا فرصة العمل في مخبرهم وتوفير الجو الملائم، وتعاونه معنا

في اكمال وإنجاز هذا العمل.

كما لا يفوتنا أيضا أن نتقدم بأسى عبارات الشكر والعرفان إلى كل

أساتذة علوم المادة.

فهرس المحتويات

I.....	الإهداء
III.....	شكر و عرفان
IV.....	فهرس المحتويات
VII.....	قائمة الأشكال
X.....	فهرس الجداول
XI	قائمة الرموز
XII.....	قائمة المصطلحات

المقدمة العامة

2.....	مقدمة عامة
3.....	مراجع المقدمة العامة

الفصل الأول: مبادئ وأساسيات الليزر والليزر الشمسي

5.....	1-1 مقدمة
5.....	2-1 نبذة تاريخية
5.....	3-1 تعريف الليزر
6.....	4-1 المبادئ العامة لليزر
6.....	1-4-1 مكونات جهاز الليزر
6.....	1-1-4-1 الوسط الفعال
8.....	2-1-4-1 وسيلة التحفيز (الضخ)
8.....	3-1-4-1 المرنان
9.....	2-4-1 خواص شعاع الليزر
9.....	1-2-4-1 احادي الطول الموجي
10.....	2-2-4-1 الترابط
10.....	3-2-4-1 الاتجاهية
11.....	4-2-4-1 السطوع
11.....	3-4-1 تفاعل الإشعاع مع المادة
11.....	1-3-4-1 الامتصاص
12.....	2-3-4-1 الانبعاث التلقائي
13.....	3-3-4-1 الانبعاث المحفز
14.....	4-4-1 أنظمة مستويات الليزر

14.....	1-4-4-1 نظام ذو مستويين.....
14.....	2-4-4-1 نظام ذو ثلاث مستويات.....
15.....	3-4-4-1 نظام ذو أربع مستويات.....
16.....	5-1 اكتشاف وتطوير الليزر الشمسي.....
18.....	6-1 تعريف الليزر الشمسي.....
18.....	7-1 أسس تقنية الليزر الشمسي.....
19.....	1-7-1 منظومة التركيز.....
19.....	2-7-1 منظومة التتبع.....
19.....	3-7-1 الوسط الفعال.....
21.....	4-7-1 منظومة التبريد.....
21.....	5-7-1 منظومة مرنان الليزر.....
21.....	8-1 الخلاصة.....
22.....	قائمة مرجع الفصل الاول.....

الفصل الثاني: تحسين كفاءة (Nd: YAG) بواسطة إضافة (Cr^{+3})

24.....	1-2 مقدمة.....
24.....	2-2 طيف الانبعاث الشمسي.....
25.....	3-2 ليزرات الحالة الصلبة المعروفة.....
25.....	4-2 أيونات الأتربة النادرة والطيف الشمسي.....
26.....	5-2 ليزرات النيوديميوم.....
27.....	1-5-2 ليزر Nd: YAG.....
28.....	6-2 طيف امتصاص (Nd: YAG).....
30.....	7-2 التطابق بين طيف امتصاص (Nd: YAG) وطيف انبعاث الشمس.....
31.....	8-2 التطعيم المضاعف (Cr: Nd: YAG).....
33.....	9-2 التطابق بين طيف الاشعاع الشمسي وطيف امتصاص (Cr: Nd: YAG).....
34.....	10-2 ميكانيزمات تحويل الطاقة الممتصة من طرف Cr إلى Nd.....
35.....	11-2 الخلاصة.....
36.....	قائمة مرجع الفصل الثاني.....

الفصل الثالث: محاكاة ومناقشة النتائج

39.....	1-3 مقدمة.....
39.....	2-3 الهدف.....
39.....	3-3 الإشكالية.....

39.....	4-3 المحاكاة العددية.....
39.....	1-4-3 برنامج "ZEMAX" تصميم منظومة الليزر الشمسي.....
40.....	1-1-4-3 المصادر (Sources).....
41.....	2-1-4-3 العناصر البصرية الهندسية (geometric optical elements).....
41.....	3-1-4-3 كائنات الكاشفات (detectors).....
41.....	4-1-4-3 تحليل طاقة الضخ الممتصة.....
41.....	LASCAD 2-4-3 محاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي.....
46.....	5-3 منظومة الليزر الشمسي.....
47.....	1-5-3 المركز الأولي (مركز القطع المكافئ).....
48.....	2-5-3 الدليل الموجي.....
49.....	3-5-3 المركز الثانوي.....
49.....	4-5-3 الوسط الفعال.....
50.....	5-5-3 التجويف الرنيني.....
50.....	6-5-3 التجويف البصري.....
51.....	7-5-3 حوض التبريد.....
51.....	6-3 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي.....
51.....	1-6-3 نتائج المحاكاة العددية ببرنامج ZEMAX.....
51.....	1-1-6-3 حساب الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Nd: YAG).....
55.....	2-1-6-3 حساب الاستطاعة من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG).....
59.....	2-6-3 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD.....
59.....	1-2-6-3 حساب طاقة خرج الليزر للوسط (Nd: YAG).....
59.....	2-2-6-3 حساب طاقة خرج الليزر للوسط (Cr: Nd: YAG).....
60.....	7-3 مناقشة النتائج.....
60.....	8-3 الخلاصة.....
62.....	قائمة مراجع الفصل الثالث.....
الخاتمة العامة	
64.....	الخاتمة العامة.....

فهرس الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
الفصل الأول		
(1-1)	صورة توضح مثال جهاز ليزر	05
(2-1)	رسم تخطيطي لمكونات جهاز الليزر	06
(3-1)	صورة توضح المادة الليزرية (Nd: YAG)	07
(4-1)	صورة توضح المادة الليزرية (Rhoda mine 6G)	07
(5-1)	صورة توضح ليزر هيليوم-نيون	08
(6-1)	صورة توضح أصناف المرنان	09
(7-1) (أ)	صورة لضوء عادي متعدد الأطوال الموجية	10
(8-1) (ب)	صورة لضوء الليزر وحيد الطول الموجي	10
(9-1)	مخطط اتجاهية ضوء الليزر والضوء العادي	11
(10-1)	مخطط آلية حدوث الامتصاص	12
(11-1)	مخطط آلية حدوث الانبعاث التلقائي	12
(12-1)	مخطط آلية حدوث الانبعاث المحفز	13
(13-1)	مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية ذو ثلاث مستويات	14
(14-1)	مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية ذو أربع مستويات	15
(15-1)	صورة للتركيب التجريبي لمرآة كروية بفتحة 14 بوصة	16
(16-1)	صورة فوتوغرافية لمنتج شمسي به مرآة كروية بقطر 61cm	16
(17-1)	رسم تخطيطي لرأس الليزر	17
(18-1)	مخطط لنظام التركيب الشمسي	17
(19-1)	نظام تجريبي لليزر من ضوء الشمس الطبيعي مكون من عدسة فريزل	18
(20-1)	رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطرفي لليزر الشمسي	20
(21-1)	رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزر الشمسي	20

الفصل الثاني

(1-2)	التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي	24
(2-2)	منحنى طيف الإشعاع الشمسي	25
(3-2)	مستويات الطاقة والانتقالات الالكترونية للنيوديميوم	27
(4-2)	منحنى طيف امتصاص (Nd: YAG)	29
(5-2)	مخطط لمستويات طاقة (Nd: YAG)	30

31	منحنى طيف انبعاث الشمس	(6-2) (أ)
31	منحنى طيف امتصاص (Nd: YAG)	(6-2) (ب)
32	خصائص امتصاص Cr^{+3} و Nd^{+3} والطاقة الممتصة من Cr^{+3} وانتقالها الى Nd^{+3}	(7-2)
33	أطياف امتصاص كل من (Nd: YAG) و (Cr: Nd: YAG) و (Cr: Nd)	(8-2)
34	تطابق طيف انبعاث الشمس مع طيف امتصاص (Nd: YAG)	(9-2)
35	التحويل الطاقوي بين Cr^{+3} إلى Nd^{+3}	(10-2)
الفصل الثالث		
40	صورة توضح واجهة برنامج ZEMAX	(1-3)
40	صورة توضح النافذة الرئيسية لبرنامج ZAMAX	(2-3)
41	صورة توضح مواد مختلفة في تحرير المكون الغير متسلسل	(3-3)
42	صورة لواجهة برنامج LASCAD	(4-3)
42	نافذة لتحديد العناصر المكونة للمرنان	(5-3)
43	نافذة لتحديد شكل وبعد وقطر الوسط الفعال	(6-3)
44	نافذة لتحديد النص العددي	(7-3)
44	نافذة لتحديد متغيرات درجة حرارة الوسط الفعال	(8-3)
45	نافذة لتحديد مختلف متغيرات مادة (Nd: YAG)	(9-3)
45	نافذة تحميل ومعالجة النتائج	(10-3)
46	تجويف الرنين وشعاع الليزر المنتشر في المستويات (Y-Z-X)	(11-3)
47	رسم تخطيطي لمنظومة الليزر الشمسي	(12-3)
48	رسم تخطيطي يوضح الأشعة الشمس المركزة بواسطة المركز ذو القطع المكافئ	(13-3)
48	رسم تخطيطي للدليل الضوئي	(14-3)
49	رسم تخطيطي للمركز الثانوي	(15-3)
49	رسم تخطيطي يوضح أبعاد الوسط الفعال	(16-3)
50	رسم تخطيطي للمرنان	(17-3)
50	رسم تخطيطي يوضح التجويف البصري	(18-3)
51	رسم تخطيطي يوضح حض التبريد	(19-3)
52	رسم تخطيطي للكاشف الضوئي في بؤرة المركز	(20-3)
53	مقطع عرضي لتوزيع الاشعاع المركز عند مخرج الدليل الموجي	(21-3)

54	رسم تخطيطي للكاشف الضوئي على طول الوسط الفعال (Nd: YAG)	(22-3)
54	نتيجة الاستطاعة الممتصة الكلية للوسط الفعال (Nd: YAG)	(23-3)
55	رسم تخطيطي يوضح الاستطاعة الضوئية في البؤرة	(24-3)
56	رسم تخطيطي يوضح الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليلي الموجي	(25-3)
56	واجهة لإدخال اسم ومختلف معلومات المادة المضافة	(26-3)
57	نافذة لتحديد نفاذية وسمك المادة المضافة بدلالة الأطوال الموجية	(27-3)
57	رسم تخطيطي للكاشف الضوئي على طول الوسط (Cr: Nd: YAG)	(28-3)
58	نتيجة الاستطاعة الممتصة الكلية للوسط الفعال (Cr: Nd: YAG)	(29-3)
59	طاقة خرج الليزر من طرف الوسط (Nd: YAG)	(30-3)
59	طاقة خرج الليزر من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG)	(31-3)

فهرس الجداول

26	عصابات الامتصاص والاصدار Cr: Nd: YAG في مجال الإشعاع الشمسي الأقصى عند 400nm و 600nm	(1-2)
28	الخصائص الحرارية لـ (Nd: YAG)	(2-2)
28	بعض الخصائص الفيزيائية والبصرية المهمة لـ (Nd: YAG)	(3-2)

قائمة الرموز

قائمة الرموز

الوحدة	الرمز	المقادير الفيزيائية المستعملة
[HZ]	ν	تردد الفوتون
[ev]	ΔE	فرق الطاقة
[J]	E	طاقة الفوتون
[J.s]	h	ثابت بلانك
/	N_1	عدد الذرات في المستوى الأدنى
/	N_2	عدد الذرات في المستوى الأعلى
[s ⁻¹]	W_{12}	احتمال الإثارة لوحدة الزمن
[s ⁻¹]	A_{21}	معامل أينشتاين للإصدار التلقائي
[s ⁻¹]	W_{21}	احتمال الإصدار المحفز لوحدة الزمن
[s]	τ_{21}	مدة حياة اشعاع الحالة المثارة
[m]	λ	الطول الموجي
[W]	P	استطاعة الليزر
[m/s]	C	سرعة الضوء
[K]	T	درجة الحرارة
[J/K]	K	ثابت بولتزمان
[cm ²]	δ	مقطع الإصدار المحفز
[W/m ²]	η	كفاءة الليزر
[W/m.k]	K	الموصلية الحرارية
[W/m ²]	I	شدة الإشعاع الشمسي
[H/m]	μ	النفاذية
[F/m]	ϵ	السماحية
/	n	قرينة الانكسار

قائمة المصطلحات

العربية	الإنجليزية
الليزر	LASER
أحادية الطيف	Monospectral
الترايط الزماني والمكاني	Temporal and spatial correlation
الاتجاهية	Directivity
ضيق النطاق	Narrow band
السطوع (اللمعان)	Brightness
كفاءة التجميع	Assembly Efficiency
الاستطاعة	Power
الوسط الفعال	Active medium
المرنان	Resonator
الضخ	Pumping
الانبعاث التلقائي	Spontaneous emission
الانبعاث المستحث (المحفز)	Stimulated emission (catalyst)
احتمال الاثارة	Excitement potential
معامل اينشتاين للامتصاص	Einstein's coefficient of absorption
معامل اينشتاين للانبعاث التلقائي	Einstein's spontaneous emission factor
معامل اينشتاين للانبعاث المحفز	Einstein's stimulated emission factor
احتمال الإصدار المحفز	Probability of induced release
توليد الليزر	Laser generation
الانقلاب السكاني	Population inversion
الحالة المثارة	Excited State
الحالة المستقرة	Steady State
الطاقة الشمسية	Solar Energy
الاشعاع الشمسي	Solar Radiation
واسع النطاق	Large_Scale
الطول الموجي	Wavelength

Speed of light	سرعة الضوء
Spectrum allocations	التوزيع الطيفي
Ultraviolet rays	الأشعة فوق البنفسجية
Visible rays	الأشعة المرئية
Infrared	الأشعة تحت الحمراء
The intensity of solar radiation	شدة الإشعاع الشمسي
Absorption	الامتصاص
Spread	الانتشار
Solar concentrators	المركزات الشمسية
Parabolic center	مركز ذو القطع المكافئ
Fresnel Lenses	عدسات فرينل
Waveguide	الدليل الموجي
Collecting solar radiation	تجميع الأشعة الشمسية
Direction of solar radiation	توجيه الأشعة الشمسية
Solar laser	الليزر الشمسي
Primary Focus system	منظومة التركيز الأولية
Tracking System	منظومة التتبع
Single Axis Tracker	متتبع أحادي المحور
Dual Axis Tracker	متتبع ثنائي المحور
Secondary Focus System	منظومة التركيز الثانوية
Indirect Pumping	الضخ غير مباشر
Direct Pumping	الضخ المباشر
Terminal Pumping	الضخ الطرفي
Lateral Pumping	الضخ الجانبي
Cooling system	نظام التبريد
Optic cavity	التجويف البصري
Resonant cavity	التجويف الرنيني
Amplification	التضخيم
Finite Element Analysis(FEA)	تحليل العناصر المتناهية (FEA)

Focus	البؤرة
Reflective mirror	مرآة عاكسة
Concentrated energy	الطاقة المركزة
Surface Detector	الكاشف السطحي
Volumetric Detector	الكاشف الحجمي
Volume points (Voxel)	نقاط حجمية (فوكسل)
Absorbed energy	الطاقة الممتصة
Emitted energy	الطاقة المنبعثة
Double vaccination	التطعيم المضاعف
Additive	المادة المضافة
Match	التطابق
Absorption spectrum	طيف الامتصاص
Emission spectrum	طيف الانبعاث
Numerical simulation	المحاكاة العددية

المقرمة العامة

مقدمة عامة:

تعتبر الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي وأساسي من الطاقات المتجددة غير النفوذه التي استغلها الإنسان منذ القدم في نشاطه اليومي لكونها طاقة دائمة ونظيفة، حيث أصبحت هذه الطاقة مع تقدم وتطور التكنولوجيا من الخيارات المثلى لتوفير الاحتياجات الطاقوية المتزايدة للعالم سواء كانت طاقة كهربائية عن طريق الخلايا الكهروضوئية، أو طاقة حرارية عن طريق المجمعات الشمسية... الخ. تم مؤخرا استغلال الأشعة الشمسية في توليد الليزر والمسمى بالليزر الشمسي.

يمكن تحويل ضوء الشمس إلى ضوء ليزر بطريقتين مباشرة (دون تحويلها إلى شكل آخر من أشكال الطاقة) وغير مباشرة (تحويلها إلى شكل آخر)، حيث تعد الطريقة المباشرة ذات أهمية متزايدة، ومن خلالها يمكن تحويل الإشعاع الشمسي عريض النطاق إلى إشعاع ليزر متماسك ومتوازي وضيق النطاق [1].

اكتشف في عام 1917م مبدأ الليزر من طرف العالم ألبرت أينشتاين عندما أثبت إمكانية الانبعاث المحفز (المستحث) [2]، والتي كانت فكرته أول أساس لإيجاد نوع جديد من الإشعاعات المنبعثة. توالت الأبحاث حول هذه الفكرة إلى غاية أوائل عام 1960م، حيث أنجزت فيها البحوث الأولى للضخ بالطاقة الشمسية، أين أستعمل Nd: YAG ليكون أفضل المواد الليزرية المضخة بالشمس بسبب خصائصه المتميزة مقارنة مع المواد الأخرى، إلا أنه يملك عصابات امتصاص ضيقة في منطقة الطيف الشمسي [3]. من خلال ذلك سعت مجموعة من الباحثين في تصنيع مواد ليزرية جديدة ذات نطاق عريض للامتصاص بنسبة تطابق عالية مع طيف الشمس، من أجل الاستغلال الفعال لطيف الشمس جاءت فكرة الاستفادة من تعريض طيف امتصاص (Nd: YAG) باستعمال التطعيم المضاعف بواسطة أيونات لكروم Cr^{+3} [4].

سنة 2007م تم تحقيق الليزر المضخ بالطاقة الشمسية مع قضيب سيراميك Cr: Nd: YAG من طرف Yabe et al [4].

عام 2017م تم تطبيق عدة محاولات لتحسين كفاءة الليزر الشمسي باستخدام (Cr: Nd: YAG) وجد أن له نطاق امتصاص واسع في المجال المرئي عند 440nm إلى 600nm [1].

من أجل تجسيد تأثير التطعيم المضاعف لـ (Nd: YAG)، بأيونات الكروم (Cr^{+3}) كان الهدف من هذا العمل هو دراسة تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي باستعمال (Cr: Nd: YAG) كوسط فعال، حيث تندرج هذه المذكرة في هذا الإطار، وهي مقسمة إلى ثلاث فصول على النحو التالي:

الفصل الأول تتم فيه دراسة عامة حول الليزر وخصائصه ومميزاته ومن ثم تطرقنا إلى الليزر الشمسي.

أما الفصل الثاني تطرقنا فيه إلى التطعيم المضاعف للوسط الفعال (Nd: YAG) بواسطة أيونات الكروم (Cr^{+3})، من أجل الاستغلال الأمثل لطيف انبعاث الشمس.

خصص الفصل الثالث لدراسة المحاكاة العددية باستعمال برنامج "ZEMAX" قصد الحصول على أكبر استطاعة ممتصة من طرف الوسط (Nd: YAG) ثم الوسط (Cr: Nd: YAG)، وبعد ذلك استعمل برنامج "LASCAD" من أجل حساب استطاعة الليزر الناتجة عن كل من الوسط (Nd: YAG) والوسط (Cr: Nd: YAG) ومن ثم المقارنة بين النتائج المتحصل عليها.

أخيرا اختتمت دراستنا بخاتمة عامة حول إنتاج الليزر الشمسي من طرف الوسط الفعال (Cr: Nd: YAG).

مراجع المقدمة العامة:

[1] J. Almeida, "Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness", thèse de doctorat, Universidad Nevada Lisboa, September, (2017).

[2] S. Chandra Singh, H. Zeng, Ch. Guo, and W. CAI, Nanomaterials: processing and characterization with laser, chapter1, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. k Ga A, 2012.

[3] صالح مصطفى الاتروشي ورياض وديع يوسف، " الليزر وتطبيقاته " مطبعة كلية العلوم، جامعة أم القرى، 2008.

[4] نور الدين حمروني، "ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين"، اطروحة دكتوراه، جامعة الوادي (2021).

الفصل الأول

مبادئ وأساسيات الليزر والليزر

الشمسي

1-1 مقدمة:

يتميز ضوء الليزر بخصائص فريدة جعلته يحدث ثورة كبيرة في علم التكنولوجيا ولازالت الأبحاث تتسابق لتطويره لإيجاد مجالات جديدة لتطبيقه، حيث أن قوة شعاعه ودقة اتجاهه يجعلان منه مصدرا مثاليا للضوء والطاقة، يتفوق على جميع المصادر التقليدية المعروفة سابقا.

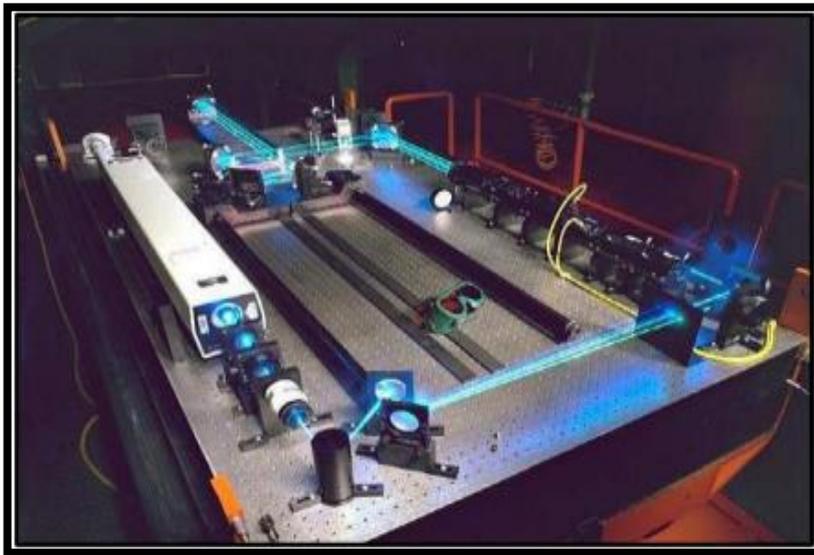
1-2 نبذة تاريخية:

كان "أينشتاين" أول من تنبأ بوجود عملية الانبعاث المحفز للإشعاع وذلك في عام 1917م [1]. بحلول عام 1960م ومن مختبرات بحوث هيوز أنتج أول إشعاع ليزر (ليزر الياقوت) في العالم من طرف الجهاز الذي صممه العالم ميمان (Maiman)، لتوليد شعاع ضوئي قوي نافذ من ياقوتة حمراء تغطي الفضة طرفيها، نابض بطول موجي 694nm. قبل نهاية هذا العام تمكن العالم جافان من إنجاز وتشغيل ليزر الهليوم-نيون (He-Ne) الغازي. أما ليزرات أشباه الموصلات فقد نشأت عام 1962م ولحقها ابتكار ليزرات سائلة وكيميائية أوائل عام 1963م [2].

كانت الليزرات في بدء نشوئها تسمى بالميزرات البصرية في الكتب والبحوث الأولى لهذا الموضوع، لكن سرعان ما حل محلها كلمة الليزر والتي تبدو عديمة المعنى في اللغة العربية لذلك يمكن الرجوع إلى الكلمة الإنجليزية Laser [2]، وهي مقتبسة من الحروف الأولى لكلمات العبارة التالية: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" والتي تعني تضخيم الضوء باستخدام الانبعاث المحفز للإشعاع [3].

1-3 تعريف الليزر:

هو إشعاع كهرومغناطيسي تتساوى فوتوناته في التردد وتتطابق في الطول الموجي، حيث تتداخل تداخلا بناء بين موجاتها لتتحول إلى نبضة ضوئية ذات طاقة عالية وشديدة التماسك زمانيا ومكانيا وبزاوية انقراج صغيرة جدا. ويمكن ترتيب شعاع الليزر الناتج في موجات مستمرة أو نبضات ذات تردد عالي ومدة نبض قصيرة جدا [4].



الشكل (1-1): صورة توضح مثال جهاز ليزر [5].

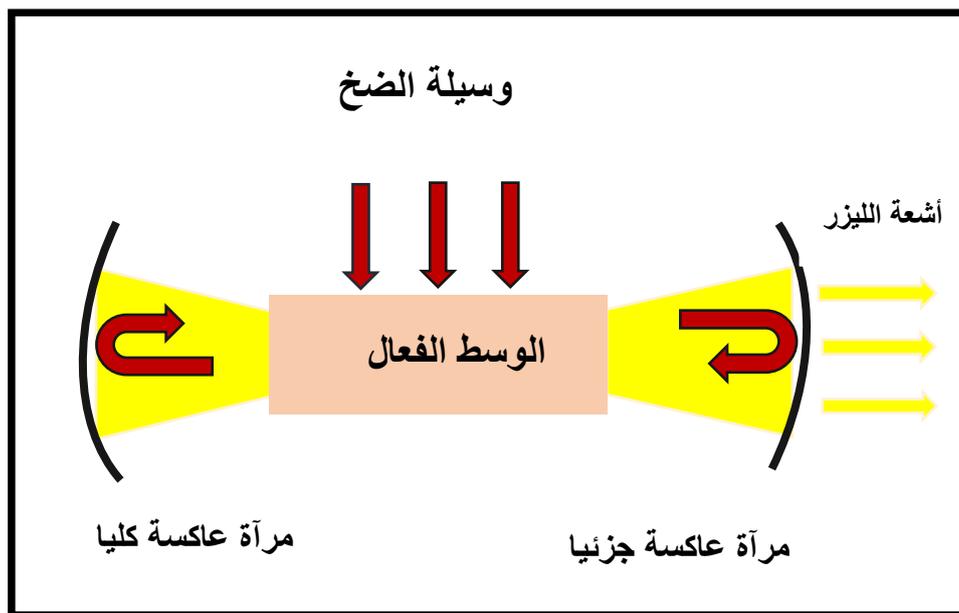
4-1 المبادئ العامة لليزر:

1-4-1 مكونات جهاز الليزر:

تتكون المنظومة الليزرية من ثلاثة عناصر رئيسية هي:

- الوسط الفعال.
- وسيلة التحفيز (الضخ).
- المرنان.

كما هي موضحة في الشكل (2-1):



الشكل (2-1): رسم تخطيطي لمكونات جهاز الليزر.

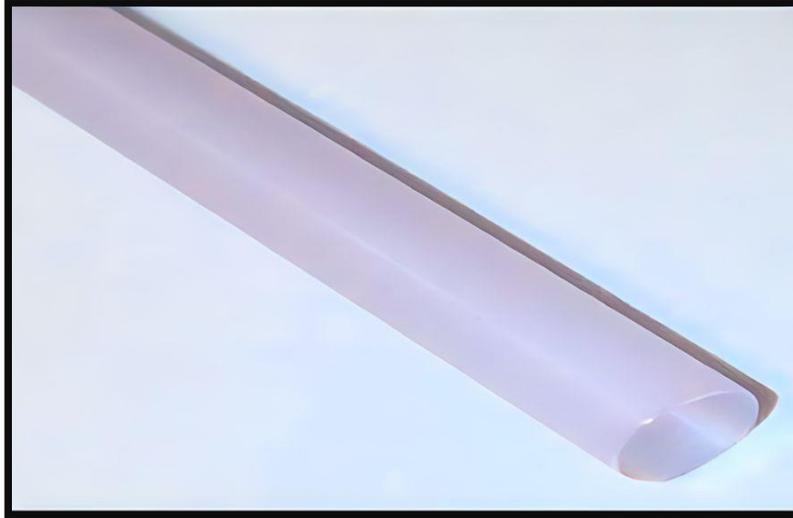
1-1-4-1 الوسط الفعال:

يمثل المادة التي تستخدم لتوليد الانبعاثات الليزرية، ويمكن أن تكون بثلاث حالات [6]:

◆ ليزر الحالة الصلبة:

عادة تكون تلك الليزر التي يكون الوسط الفعال فيها إما بلورة عازلة أو زجاجاً، مثل ليزر (Nd: YAG)

[7]، الموضح في الشكل (3-1).



الشكل (1-3): صورة توضح المادة الليزرية (Nd: YAG) [8].

◆ ليزر الحالة السائلة:

يلجأ هذا النوع للأصبغ الكيميائية العضوية مثل الرودامين (Rhoda mine 6G) كوسط فعال، وهي ذات أطوال موجات مختلفة [2]. كما هو موضح في الشكل (1-4).



الشكل (1-4): صورة توضح المادة الليزرية (Rhoda mine 6G) [9].

◆ ليزر الحالة الغازية:

هو ليزر يعتمد على مادة غازية مثل النيون والهيليوم (He-Ne) وغاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) ويمكن تشغيلها بنمط نبضي ونمط مستمر، ويتراوح مدى طول الموجة لهذه الليزرات الغازية بين الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء [5] [10]، والشكل (1-5) يوضح ذلك.



الشكل (1 - 5) : صورة توضح ليزر هيليوم - نيون [5].

2-1-4-1 وسيلة التحفيز (الضخ):

إرسال الطاقة من مصدرها إلى الوسط الفعال قصد تحفيز ذراته وهناك عدة تقنيات للضخ نذكر أهمها [5]:

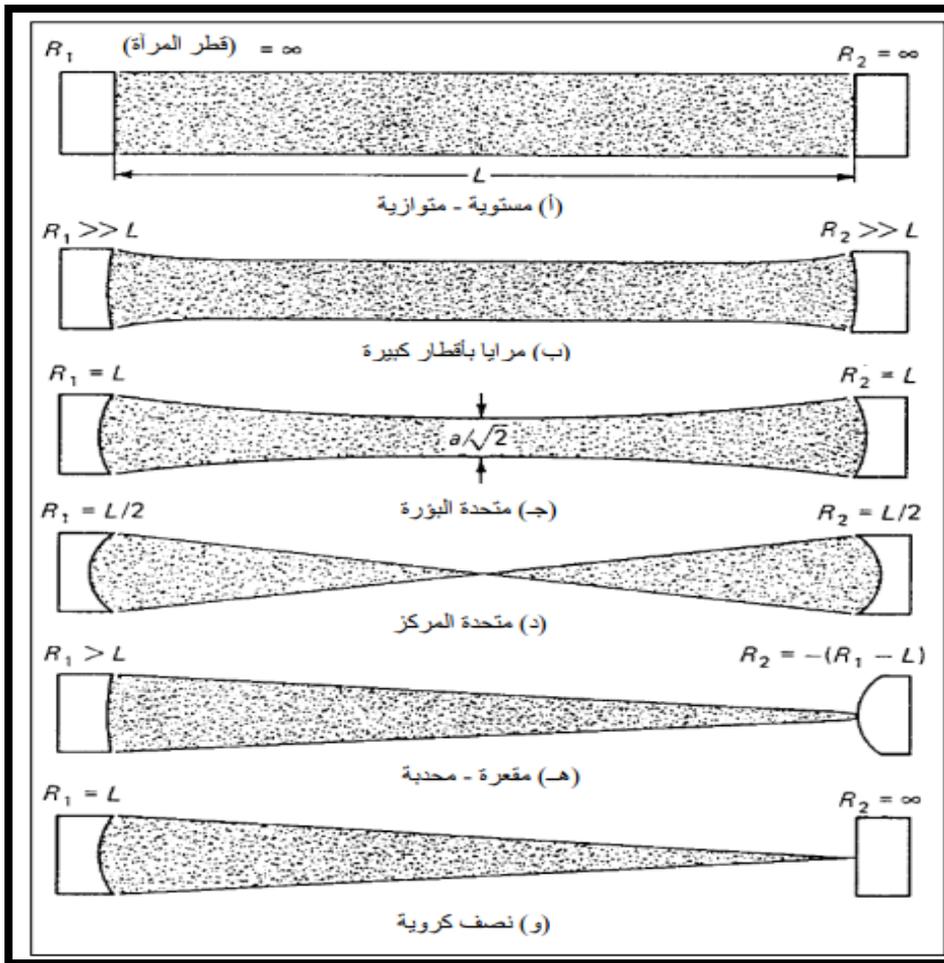
♦ **الضخ الضوئي:** هو تسليط الضوء على المادة الفعالة لنقل ذراتها إلى سوية أعلى وهذه التقنية مناسبة في ليزرات الحالة الصلبة.

♦ **الضخ الكيميائي:** يتم عن طريق التفاعلات الكيميائية للمادة الفعالة مع مواد أخرى.

♦ **الضخ الكهربائي:** تستخدم الطاقة الكهربائية لإثارة ذرات الوسط الفعال.

3-1-4-1 المرنان:

هو عبارة عن منظومة مكونة من مرآتين مثبتتين على جانبي مادة إنتاج الليزر، تكون المرآة الأولى عاكسة كلياً والثانية عاكسة جزئياً، حيث تعمل هذه المرآتين على عكس بعض الفوتونات إلى داخل الوسط الفعال عدة مرات. تتمثل وظيفته في تضخيم وتعزيز قوة الحزمة التي تم إنشاؤها من انتقال الفوتونات ذهاباً وإياباً [7]، الشكل (1-6) يوضح أصناف المرنان.



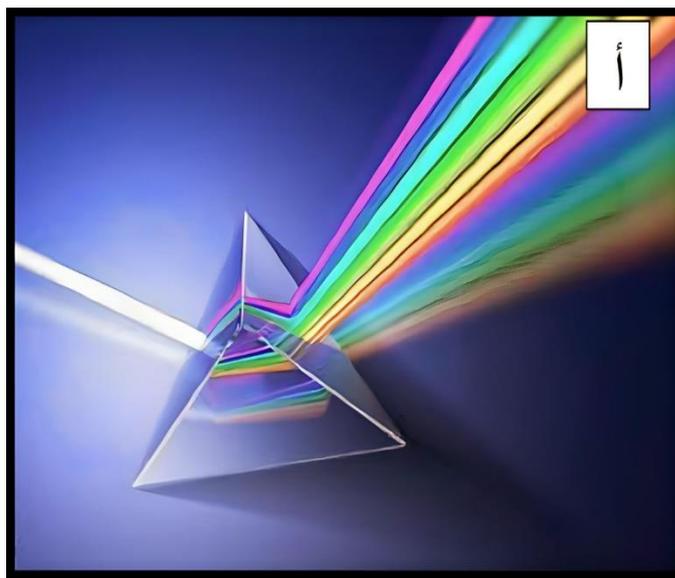
الشكل(6-1): صورة توضح أصناف المرنان [11].

2-4-1 خواص شعاع الليزر:

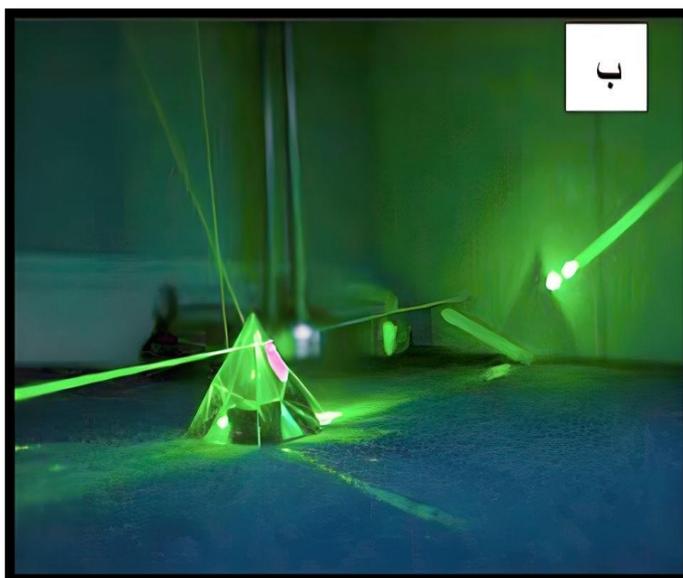
لليزر أربعة خصائص تميزه عن بقية الأضواء تتمثل في:

1-2-4-1 أحادي الطول الموجي:

يعني أن له عرض طيفي ضيق ينتج عنه تردد منفرد نقي وهذه الصفة الموجية كانت تتميز بها أشعة الراديو دون سواها [4]، كما هو موضح في الشكلين (7-1) (8-1).



الشكل (1-7): (أ) صورة لضوء عادي متعدد الأطوال الموجية [12].



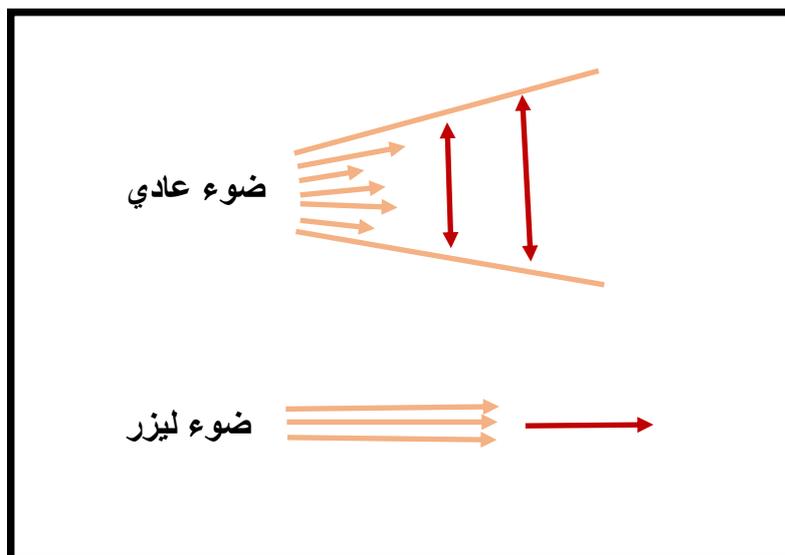
الشكل (1-8): (ب) صورة لضوء ليزر وحيد الطول الموجي [12].

2-2-4-1 الترابط:

يعتبر الليزر المصدر الضوئي الوحيد الذي يمتلك صفة الترابط مقارنة بالمصادر الأخرى، ويعني الفرق بين أي نقطتين على موجة شعاع الليزر ويكون ثابت عند حركة الشعاع [3].

3-2-4-1 الاتجاهية:

انتشار الحزمة باتجاه واحد ولمسافات طويلة جدا دون انحرافها على محورها أو انفراج قليل جدا، أي تكون زاوية التشتت معدومة [3]، كما هو موضح في الشكل (1-9).



الشكل(1-9): مخطط اتجاهية ضوء الليزر والضوء العادي.

1-4-2-4 السطوع:

يعرف سطوع المصدر الضوئي على أنه مقدار الطاقة المنبعثة في وحدة الزمن ولوحدة المساحة من السطح ولكل وحدة زاوية مجسمة، نتيجة لخاصية استقامة الاتجاه في أشعة الليزر أصبحت درجة برقيها عالية لدرجة لا يصل إليها أي ضوء عالي مهما كان مصدره [13].

1-4-3 تفاعل الإشعاع مع المادة:

عند تفاعل موجة كهرومغناطيسية مع المادة تحدث فيها ثلاث ظواهر أساسية والمتمثلة في الامتصاص والانبعث التلقائي والانبعث المحفز، الذي يوصف بالتردد التالي [10].

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \quad (1-1)$$

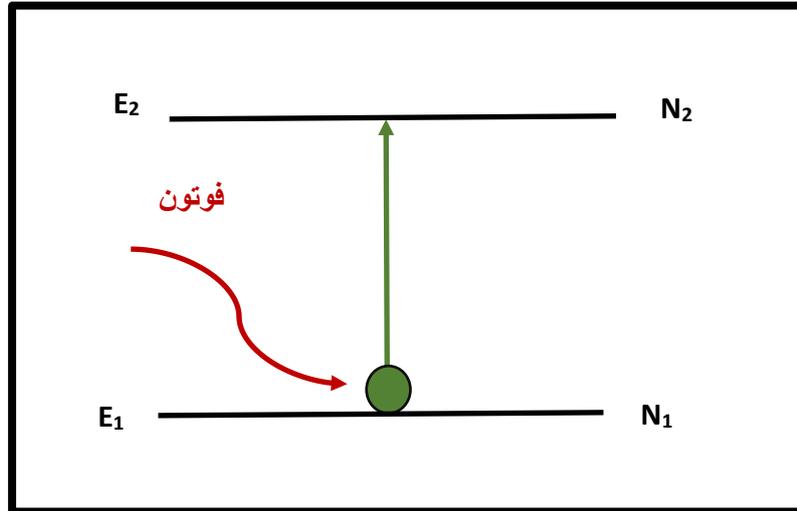
$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad \text{حيث}$$

E_1, E_2 : هما طاقات الحالات التي يحدث وسطهما الانتقالات.

h : ثابت بلانك.

1-4-3-1 الامتصاص:

هو الألية التي يمر بها الأيون من المستوى E_1 إلى المستوى E_2 وذلك عندما يحدث تفاعل الإشعاع مع المادة الساقط عليها، ومن خلال ذلك يتم عملية الامتصاص لطاقة الإشعاع مما يسبب في انتقال إلكترونات الذرة المكونة للمادة إلى مستويات أعلى أي مثارة [13]، والشكل (1-10) يوضح ذلك.



الشكل(10-1): مخطط آلية حدوث الامتصاص.

ويعطى معدل الامتصاص بالمعادلة الآتية [13]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12} N_1 \quad (2-1)$$

حيث

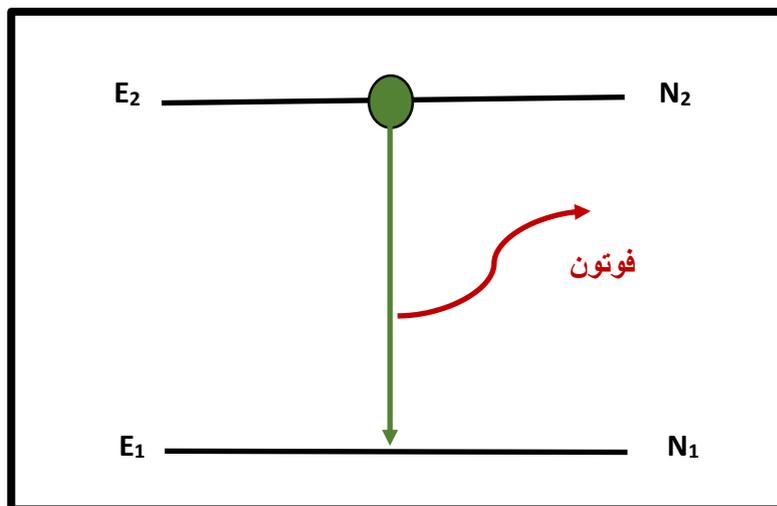
معدل الامتصاص: $\frac{dN_1}{dt}$

W_{12} : احتمالية الامتصاص من المستوي E_1 إلى المستوي E_2 .

N_1 : اسكان المستوي E_1 .

2-3-4-1 الانبعاث التلقائي:

هي عملية فقدان الطاقة من المادة بشكل تلقائي على شكل ضوء أو حرارة بدون تأثير خارجي، فتحرر فوتون (باتجاه عشوائي) بطاقة قدرها $E_2 - E_1 = h\nu$ [13]، والشكل(11-1) يوضح ذلك.



الشكل(11-1): مخطط الية حدوث الانبعاث التلقائي.

ويعطى معدل الانبعاث التلقائي بالمعادلة التالية [13]:

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

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}} \quad \text{حيث}$$

$\frac{dN_2}{dt}$: معدل الانبعاث التلقائي.

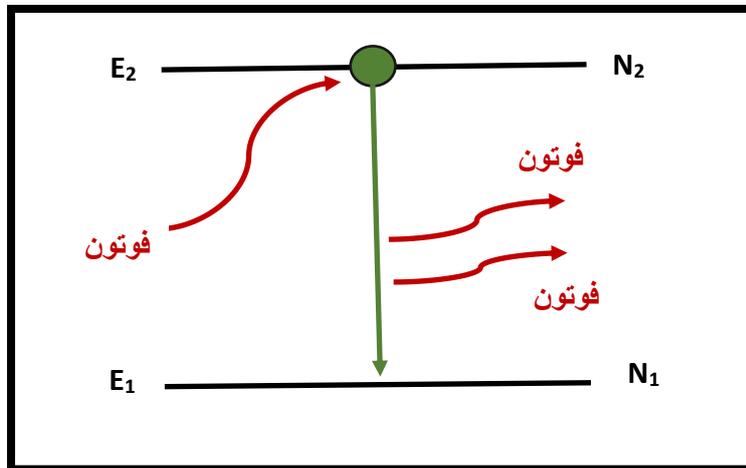
A_{21} : معامل أينشتاين للإصدار التلقائي وحدته s^{-1} .

τ_{21} : مدة حياة إشعاع الحالة المثارة.

3-3-4-1 الانبعاث المحفز:

إذا سكن الإلكترون مستوى أعلى من المستوى الأساسي فإن الذرة حتما ستكون غير مستقرة، فلا يلبث أن يعود تلقائياً ويمكن أن يحثه ورود فوتون خارجي على الذرة بنفس التواتر.

ينزل الإلكترون الفوتون الوارد ويعودته إلى المستوى الأساسي يصدر طاقة على شكل فوتون له نفس الخصائص الطيفية للفوتون الوارد [13]، والشكل (12-1) يوضح ذلك.



الشكل (12-1): مخطط الية حدوث الانبعاث المحفز.

ويعطى معدل الانبعاث المحفز بالمعادلة التالية [13]:

$$\frac{dN_2}{dt} = - W_{21} N_2 \quad (4-1)$$

حيث

$\frac{dN_2}{dt}$: معدل الانبعاث المحفز (المستحث).

W_{21} : احتمالية الانبعاث المحفز من المستوى E_2 إلى المستوى E_1 .

N_2 : اسكان المستوى E_2 .

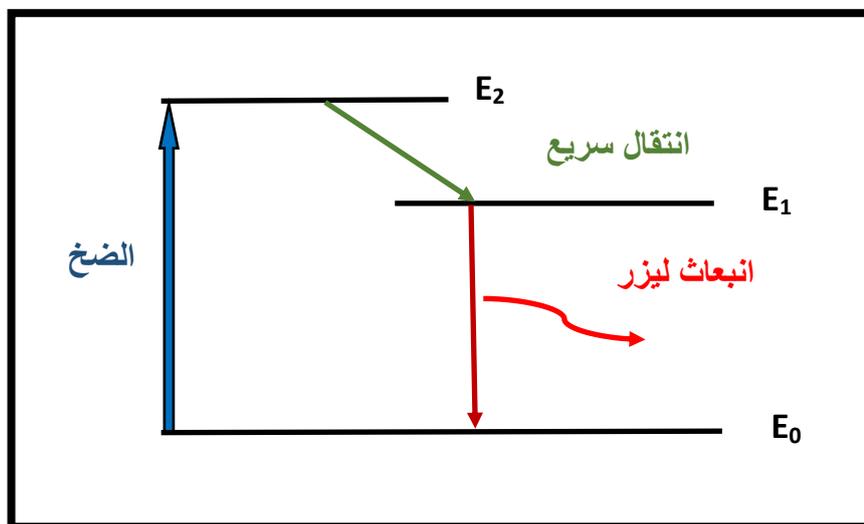
1-4-4-1 أنظمة مستويات الليزر:

1-4-4-1 نظام ذو مستويين:

لا يمكن الحصول على ليزر من نظام ذو مستويين للطاقة (المستوي الأرضي ومستوي آخر) لأنه مهما قمنا بالضخ فإنه بعد فترة زمنية سوف تعود الذرات المثيجة من المستوي E_2 إلى المستوي E_1 مع انبعاث فوتون واحد ويصبح معدل ضخ الذرات يساوي معدل تحللها.

1-4-4-2 نظام ذو ثلاث مستويات:

يعتمد توليد الليزر على انتقال ذرات الوسط الفعال بين ثلاث مستويات للطاقة أي المستوي الأرضي E_0 والمستويين E_1 و E_2 ، كما هو موضح في الشكل (13-1). عند تهيج الوسط الفعال بواسطة إحدى طرق الضخ فإن الذرات تنتقل من المستوي E_0 إلى المستوي المثيج E_2 ولضمان توليد الليزر ينبغي أن تكون طاقة الضخ كافية لإحداث الانقلاب السكاني، فسرعان ما تعود الذرات إلى حالة الاستقرار E_1 ، والفرق بين المستويين (E_1 و E_2) يتحول إلى طاقة حرارية، إذا كان عدد الذرات في المستوي E_1 أكبر من نصف عدد الذرات الكلي في الوسط الفعال يكون قد تحقق الانقلاب السكاني، فعند هبوط الذرات إلى المستوي المستقر E_0 ينبعث الليزر [2].



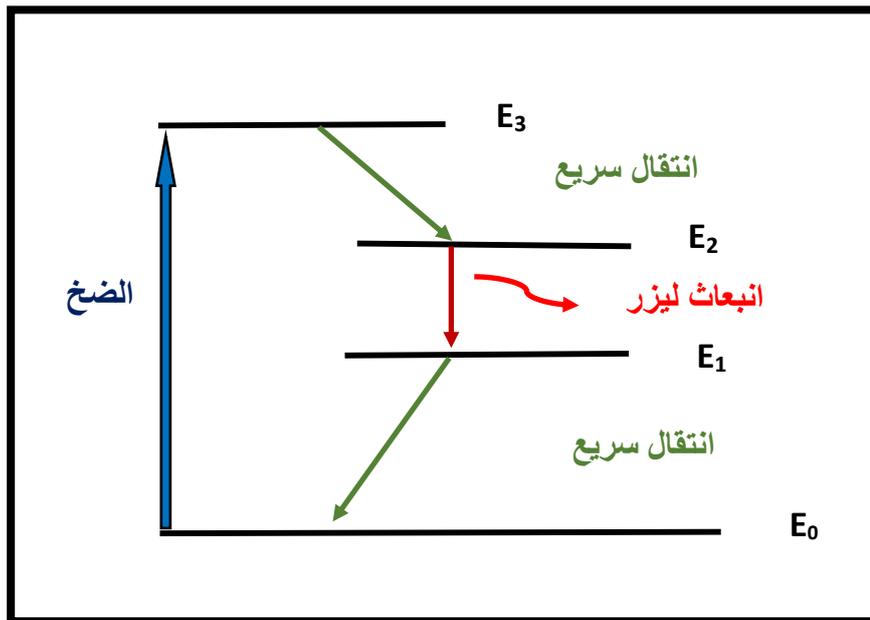
الشكل (13-1): مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية ذات ثلاث مستويات.

✓ خصائص نظام ذو ثلاث مستويات:

- لهذا النظام مجموعة من الخصائص تتمثل في [14]:
- المستوي الأرضي وهو نفسه المستوي الليزري السفلي.
 - للحصول على الانقلاب السكاني يجب ضخ نصف عدد الذرات من المستوي الأرضي إلى المستوي العلوي، لذلك نحتاج إلى طاقة ضخ عالية جدا.

1-4-4-3 نظام ذو أربع مستويات:

نظام يتكون من أربعة مستويات طاقة، المستوى الأرضي E_0 والمستوي الليزري السفلي E_1 ، ومستوي الإثارة E_2 ، والمستوي الليزري العلوي E_3 ، كما هو مبين في الشكل (1-14). تثار الذرات لتنتقل من المستوى E_0 إلى المستوى E_3 ، حيث يملك المستوى E_3 عمر قصير جدا مما يجعل انتقال الذرات إلى المستوى E_2 مسرعا وغير مشع، ويكون هذا الأخير لديه عمر طويل نسبيا مما يسهل عملية الانقلاب السكاني، أي يكون عدد الذرات في المستوى E_2 أعلى بكثير من المستوى E_1 لأن المستوى E_1 يكون فارغا في البداية لبعده عن المستوى الأرضي مما يسهل تفريره بسرعة، ثم تنتقل هذه الذرات من المستوى E_1 إلى المستوى E_0 بانتقال غير مشع وسريع، وفي النهاية نحصل على الفعل الليزري بين المستويين E_1 و E_2 . [10].



الشكل (1-14): مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية ذو أربع مستويات.

✓ خصائص نظام ذو أربع مستويات:

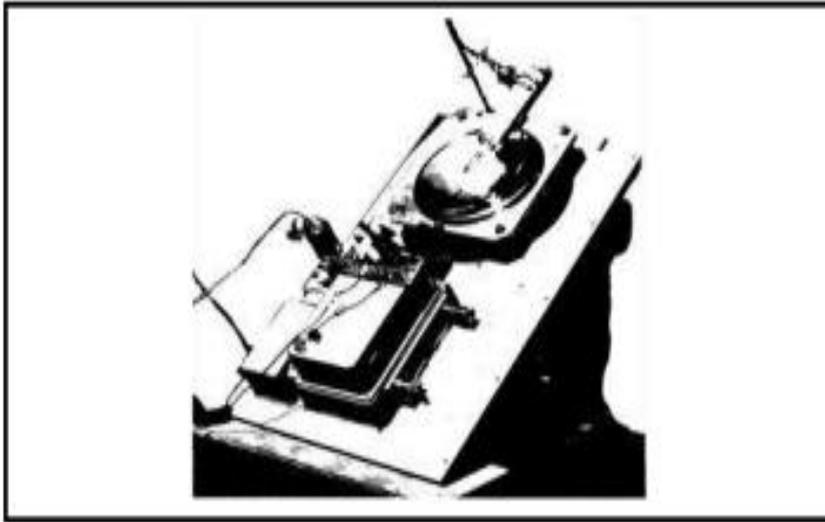
- لهذا النظام مجموعة من الخصائص تتمثل في [14]:
- المستوى الأرضي هو ليس نفسه المستوى الليزري السفلي، لذلك فإننا لا نحتاج إلى مصدر ضخ قوي جدا لتحقيق الانقلاب السكاني.
- أكثر المواد المستخدمة لتوليد الليزر تكون ذات نظام رباعي المستويات.
- إذا كان عدد الذرات في المستوى E_2 أكبر من المستوى E_1 بمقدار واحد فإن هذا يعني حدوث الانقلاب السكاني بينهما.

❖ تبين مما سبق أنه يجب البحث عن المادة التي يمكن أن تعمل كنظام ذو أربع مستويات بدلا من نظام ذو ثلاث مستويات لأنه يمكن الحصول على الانقلاب السكاني بسهولة في حالة المستويات الأربعة.

بعد اكتشاف وتطوير الليزر سعى العلماء للبحث عن مصادر أقل تكلفة وأكثرها توفراً، ومن خلال هذا البحث وجدوا أن ضوء الشمس مصدر رئيسي للطاقات متوفر ومتجدد ومجاني، ويمكن استخدامه كوسيلة ضخ لليزر ومن هنا ظهرت فكرة الليزر الشمسي.

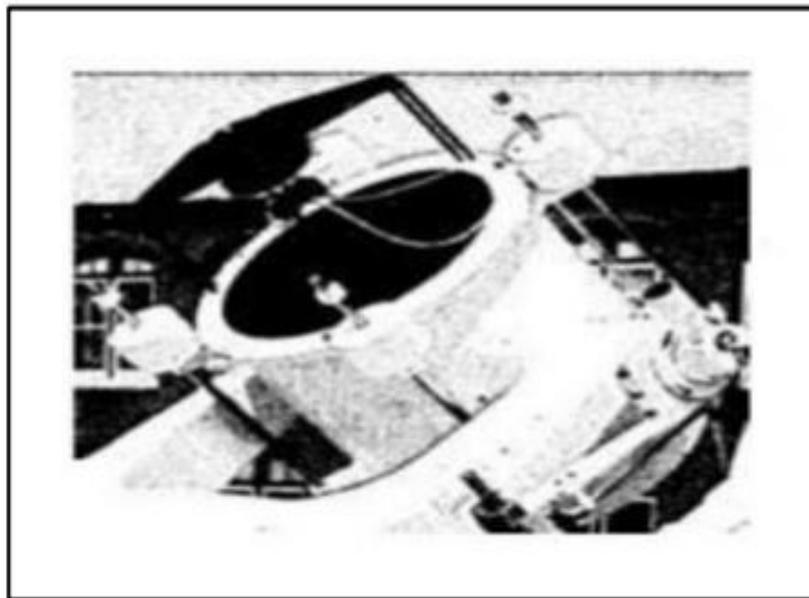
5-1 اكتشاف وتطوير الليزر الشمسي:

بدأت فكرة الليزر الشمسي بعد ظهور الليزر بوقت قصير حيث كانت البداية لأول ليزر شمسي للحالة الصلبة في عام 1963م أعلن عليها العالم كيس (kiss) وجماعته باستخدام بلورة (CaF_2) بواسطة مرآة كروية عن طريق الضخ الجانبي كما هو موضح في الشكل (15-1) [13].



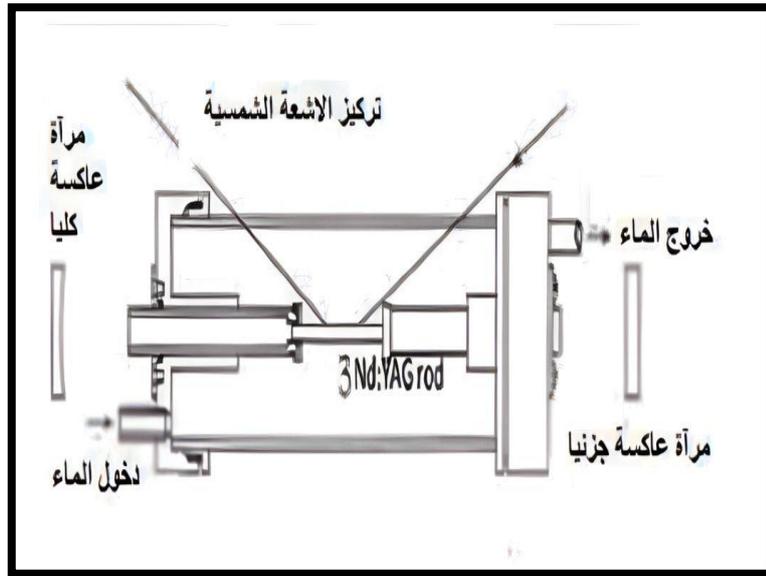
الشكل (15-1): صورة للتركيب التجريبي لمرآة كروية بفتحة 14 بوصة [13].

عام 1966م تم تحقيق أول ليزر شمسي باستطاعة قدرها 1w من قبل العالم يونغ باستعمال مادة (Nd: YAG) وتلسكوب معدل Cassegrain suntracking الذي يتكون من مركز أساسي قطره 61cm، كما هم مبين في الشكل (16-1) [16].



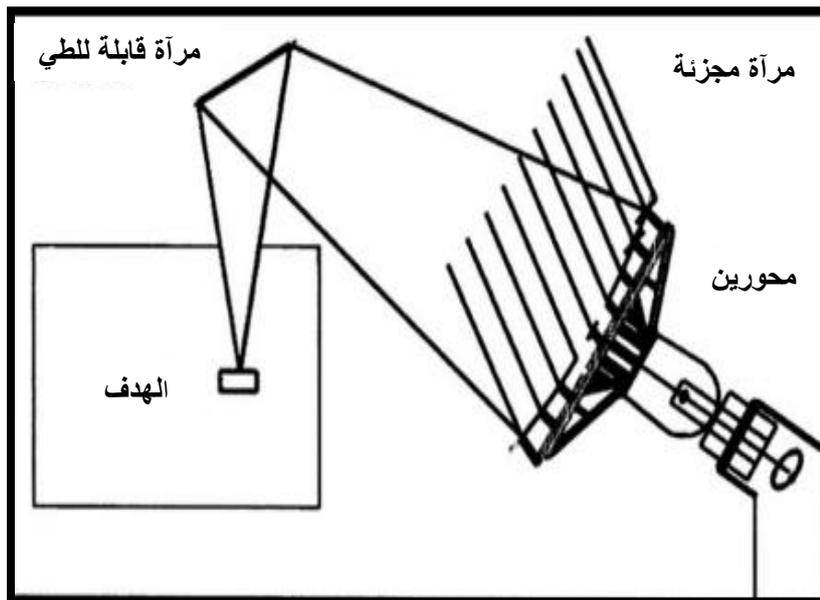
الشكل (16-1): صورة فوتوغرافية لمتتبع شمسي به مرآة كروية بقطر 61cm [13].

بعد عمل يونغ لم يكن هناك تقدم كبير في مجال أبحاث الليزر الشمسي، حتى عام 1984م تحصل أراشي وزملائه على الليزر باستطاعة 18w باستخدام (Nd: YAG) أحادي البلورة، حيث تم تحقيق كفاءة تجميع الليزر الشمسي 0.23 w/m^2 [14].



الشكل (1-17): رسم تخطيطي لرأس الليزر [15].

زادت الدراسات والأبحاث حول الليزر الشمسي وطرق تحسين كفاءته وسطوعه واستقرار حزمته، حيث في عام 2003م حسن (Lando) وزملائه كفاءة جمع الليزر الشمسي (Nd: YAG) إلى 6.7 w/m^2 ، كما حقق سطوع قدره 0.032 w [13].



الشكل (1-18): مخطط لنظام التركيز الشمسي [13].

تم في عام 2007م اعتماد عدسة فريزل كمرکز أول للطاقة الشمسية بواسطة Yabe ومن معه عزز بشكل كبير كفاءة تجميع الليزر الشمسي إلى 18.7 w/m^2 بالضح الطرفي-الجانبی، وكانت أيضا المرة الأولى التي يتم

فيها اختبار ليزر Cr: Nd: YAG لتحسين كفاءته نظرا لامتناس طيف ضوء الشمس المناسب مقارنةً بـ [13]Nd: YAG.



الشكل (19-1): نظام تجريبي لليزر من ضوء الشمس الطبيعي مكون من عدسة فريزل [13].

عام 2017م تمت دراسة خاصية التضخيم من سيراميك Cr: Nd: YAG تحت ضخ أشعة الشمس ولمحاكاة مصدر الضخ الشمسي تم استخدام مصباح فلاش Xe. حيث تم تضخيم ليزر بطول موجي 1064 nm بواسطة مرآة من السيراميك متعددة المراحل Cr: Nd: YAG عند استطاعة ضخ الليزر بـ 2340 w/m^2 كانت درجة حرارة قرص السيراميك 100°C ، وتم تحقيق استطاعة الليزر الناتجة بصيغة نبضية بـ 1.6Kw وكما تم أيضا تقييم كفاءة التحويل الضوئي لحجم السيراميك التي مر بها الليزر بـ 63% [16].

6-1 تعريف الليزر الشمسي:

عبارة عن ليزر يستخدم الطاقة الشمسية كوسيلة للضخ، حيث يعتمد على تركيز الإشعاع الشمسي عريض النطاق وتحويله إلى إشعاع ضيق النطاق ومتناسك من أجل الحصول على كثافة ضخ عالية لتوليد الليزر، وله نفس خصائص ومميزات الليزر الأخرى يختلف فقط في مصدر الطاقة [16].

7-1 أسس تقنية الليزر الشمسي:

تتكون منظومة الليزر الشمسي من عدة أجزاء أساسية من بينها ما يلي:

- منظومة التركيز.
- منظومة التتبع.
- الوسط الفعال.
- منظومة التبريد.
- منظومة مرنان الليزر.

1-7-1 منظومة التركيز:

تتكون منظومة التركيز من جزأين هما منظومة التركيز الأولية والثانوية:

أ- منظومة التركيز الأولية:

عبارة عن جهاز يكون من نوع عدسة فرينل أو المرايا القطعية المكافئة.... الخ، يعمل على تجميع أشعة الشمس وتركيزها العالي نحو الوسط الفعال لأن ضوء الشمس الطبيعي لا يوفر تدفق كافيا لإثارة وسط التضخيم لليزر الشمسي [13].

ب- منظومة التركيز الثانوية:

جهاز يعمل على إعادة تركيز الأشعة المركزة في منظومة التركيز الأولية لزيادة تركيز وتوجيه ضوء الشمس المركز نحو قضيب الليزر (الوسط الفعال) وذلك لصغر قطر المستقبل [13].

1-7-2 منظومة التتبع:

جهاز يتكون من دوائر تحكم إلكترونية وعناصر ميكانيكية تعمل على توجيه المركز أو المرايا العاكسة نحو الشمس، تستخدم هذه الأليات لزيادة كفاءة منظومة الليزر الشمسي [13]. توجد فئتان رئيسيتان من هذه الأليات هما:

أ- أحادي المحور: هو محور لديه درجة واحد من حرية الدوران حول محور موازي تقريبا لمحور الأرض.

ب- ثنائي المحور: هو محور له درجتين من حرية الدوران، قادر على محاذاة مثالية مع الشمس في جميع الأوقات ولها الأداء الأمثل على مدار السنة.

1-7-3 الوسط الفعال:

هو مادة تكتسب ذراتها طاقة من خلال عملية الضخ بالأشعة الشمسية لإثارتها، ليتم فيها انتقال الذرات، حيث أن المادة الأكثر استعمالا في الوسط الفعال هي الحالة الصلبة بالرغم من اعتبار الليزر السائل والغاز كمرشحين لليزر الشمسي إلا أن تقارب الأبحاث بشكل أساسي في أنظمة الحالة الصلبة خاصة (Nd: YAG) هي من وجهتها بكونها الأنسب كمادة فعالة للمنظومة الليزرية [13]. تتمثل أنواع هذا الضخ في:

أ- الضخ الغير مباشر:

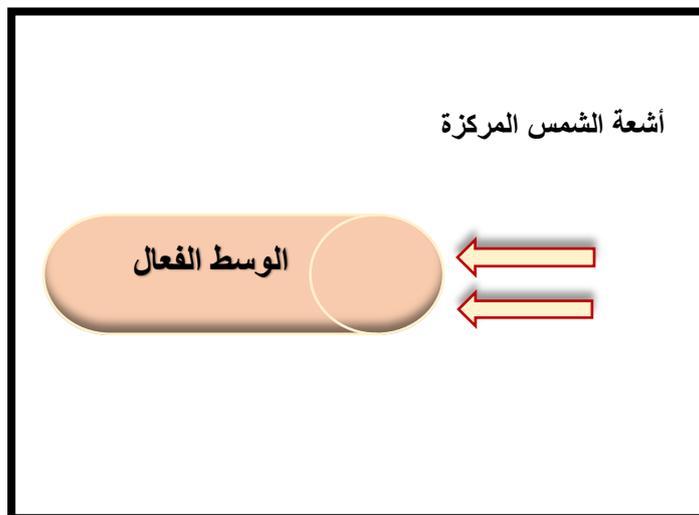
يمكن لضوء الشمس إلقاء الضوء على الخلايا الشمسية لإنتاج الكهرباء بواسطة الإشعاع الشمسي وذلك لإنتاج توليد ضوء الليزر. كما يمكن أن يكون النظام الكهربائي محولا ضوئيا يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية [17].

ب- الضخ المباشر:

ضخ الليزر بواسطة ضوء الشمس وذلك بوضع الوسط الفعال في البقعة البؤرية للمركز الشمسي أو وضعها بعيدة عن البقعة، لأن ضوء الشمس المباشر لا يوفر تدفقا كافيا لإحداث الفعل الليزري. حيث هناك تقنيتين للضخ المباشر لليزر الشمسي هما الضخ عند الأطراف والضخ الجانبي [17]:

• الضخ عند الأطراف:

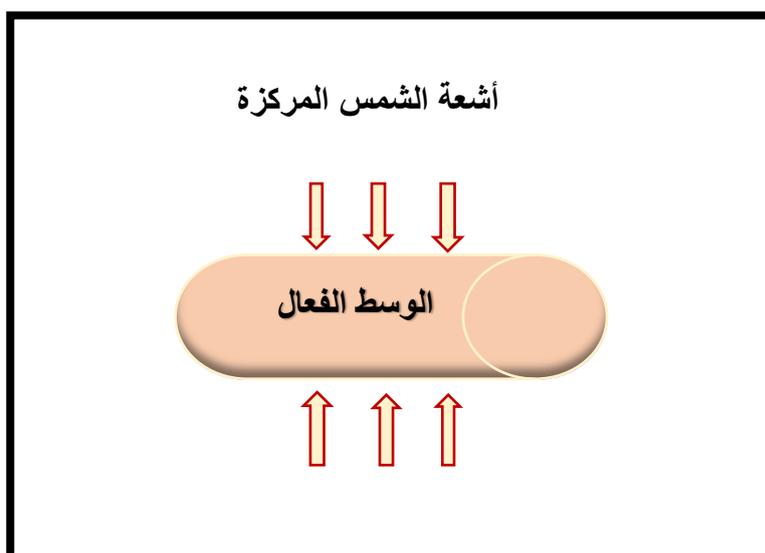
يتم تسليط الإشعاع الشمسي المركز نحو أحد أطراف وسط الليزر كقطع مكافئ أو عدسة فريزل، ليتم اقتترانها بفتحة إخراج بمركز ثاني من نوع مركز مخروطي أو مركز مكافئ من أجل تجميع الأشعة وتركيزها في نهاية واحدة للقضيب الليزري (الوسط الفعال) [16].



الشكل(1-20): رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطرفي لليزر الشمسي.

• الضخ الجانبي:

يتم تسليط الإشعاع الشمسي المركز نحو السطوح الجانبية لوسط ليزر أسطواني من أجل تجميع الأشعة وتركيزها على جوانب طول الوسط الفعال لليزر باستخدام مركز ثاني من نوع (2D-CPC) أو تجويف بصري (2V) أو مرآة مخروطية... الخ [16].



الشكل(1-21): رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزر الشمسي.

1-7-4 منظومة التبريد:

السبب الذي يواجه منظومات الليزر الشمسي هو ارتفاع درجة الحرارة الناتجة من الانتقالات الغير ليزرية والاختلاف بين طاقة ضخ الفوتونات وطاقة فوتونات الليزر داخل الوسط الفعال، حيث تمثل هذا السبب في نشوب هذه الظاهرة التي تؤدي إلى تلفها وانخفاض في تحويلها البصري. فمن الضروري جدا تبريد وسط الليزر ويكون عادةً بالماء [13].

1-7-5 منظومة مرنان الليزر:

كما تطرقنا إليها سابقا في المنظومة الليزرية وهي عبارة عن مرآتي أو أكثر ذات نسب مختلفة في الانعكاس تعمل على تضخيم الأشعة التي تم إنشاؤها من انتقال الفوتونات ذهاباً وإياباً [13].

1-8 الخلاصة:

تم التطرق في هذا الفصل إلى الليزر الشمسي الذي يتم توليده تحت شروط معينة من خلال آلية تفاعل مادة - إشعاع.

تعتبر الطاقة الشمسية مصدر وفير ومتجدد ودائم ليتم من خلالها تجميع أشعة الشمس وضخ الوسط الفعال (Nd: YAG) للحصول على الليزر الشمسي، حيث قدرت نسبة تطابق طيف امتصاصه مع طيف انبعاث الشمس 16% [18]، وهي نسبة ضيقة نسبياً. لتوسيع هذا الطيف لجئ في بادئ الأمر إلى التطعيم المضاعف بواسطة أيونات الكروم (Cr^{+3}) وهذا ما سيتم درسته في الفصل الموالي.

قائمة مراجع الفصل الأول:

- [1] S. Ch. Singh, H. Zeng, Ch. Guo, and W. CAI, Nanomaterials: processing and characterization with laser, chapter1, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. k Ga A, 2012.
- [2] صالح مصطفى الاتروشي ورياض وديع يوسف، " الليزر وتطبيقاته"، مطبعة كلية العلوم، جامعة أم القرى 2008.
- [3] رائد خضر سلمان الفهداوي، " محاضر الليزر"، جامعة الانبار (2015-2016).
- [4] سعود بن حميد اللحياني، مطبوعة محاضرات الليزر " الليزر وتطبيقاته"، مطبعة جامعة أم القرى، 2009.
- [5] حازم فلاح سكيك، " سلسلة محاضرات الليزر وتطبيقاته"، جامعة الأزهر، غزة (2015).
- [6] محمد كوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، مطبعة كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، سوريا (2005-2006).
- [7] يمينة كرمية، " ضخ الأوساط الفعالة بالإشعاع الشمسي (حالة الليزر)"، مذكرة ماجستير، جامعة الوادي (2013).
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser
- [9] <https://www.flickr.com/photos/67292116@N00/7476346232>
- [10] بيلا آ. لينكيل، ترجمة فاروق عبودي قيصر (1984)، " الليزرات"، جامعة الموصل، العراق.
- [11] S. Mehellou, " pompage optique des lasers par faisceau solaire", thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [12] /<https://thedayintech.wordpress.com/light-amplification-by-stimulated-emission-of-radiation>
- [13] نور الدين حمروني، "ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين"، أطروحة دكتوراه، جامعة الوادي (2021).
- [14] عدي عطا حمادي، " أساسيات الليزر وتطبيقاته"، دار الكندي للنشر والتوزيع، (2004).
- [15] S. Mehellou, F. Rehouma, N. Hamrouni, L. Bouras, "Thermal loading effects on Nd: YAG solar-laser performance in end-pumping and side-pumping configurations: a review", Opt. Eng. 57(5-12), (2018).
- [16] J. Almeida, "Advances in solar-pumped laser efficiency and brightness", thèse de doctorat, Universidad Nevada Lisboa, September, (2017).
- [17] R. da C. A. G. de Matos, "High-efficiency solar laser pumping by a ring-array concentrator", Dissertation for obtaining the Master's Degree in physical Engineering, NOVA University of Lisbon, (2019).
- [18] B.Tiburio, "Solar- Pumped laser technology " Dissertação para optenao Grau de Doutoramento, Universidade nova de Lisboa, Marco, 2022.

الفصل الثاني

تحسين كفاءة (Nd: YAG) بواسطة

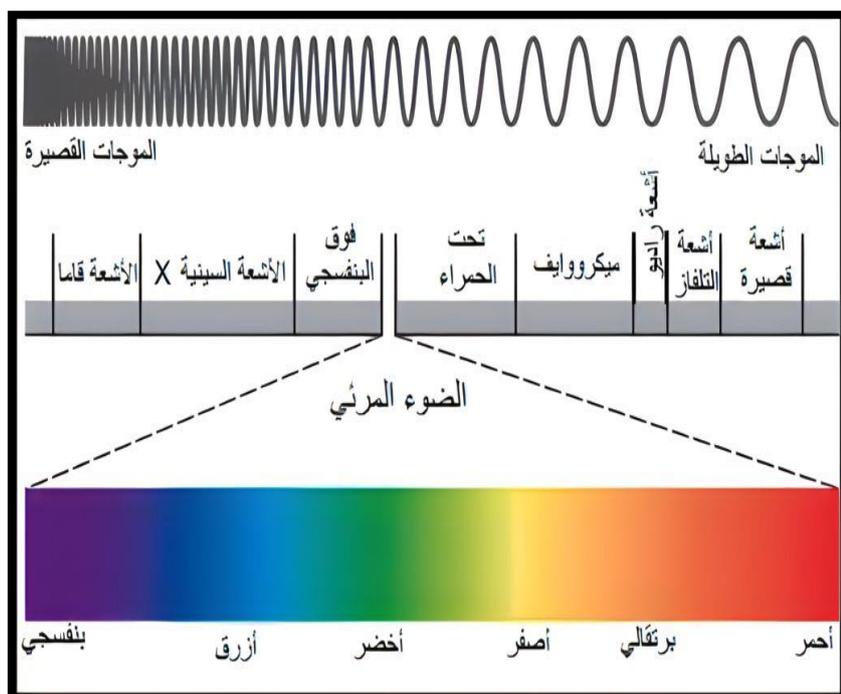
إضافة أيونات (Cr^{+3})

1-2 مقدمة:

تعمل أجهزة الليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية على تحويل الإشعاع الشمسي عريض النطاق وغير متماسك إلى انبعاث ليزر ضيق النطاق ومتماسك من خلال الوسط النشط (Nd: YAG) [1]. بالرغم من خصائص هذا الوسط الجيدة إلا أنه يمتلك تداخل ضعيف بين نطاق طيف امتصاصه مع نطاق طيف انبعاث الشمس، ولتجاوز هذا العيب سعت مجموعة من الباحثين على تحسين هذا النطاق، وذلك من خلال إضافة مواد لهذا الوسط وعلى وجه الخصوص إضافة مادة (Cr³⁺) لتوسيع هذا الطيف [2]، وهذا ما يسمى بالتطعيم المضاعف.

2-2 طيف الانبعاث الشمسي:

الطاقة المنبعثة من الشمس تغطي مدى واسع من الطيف الكهرو مغناطيسي، حيث تمتد من أطوال الموجات القصيرة جدا مثل (الأشعة غاما والأشعة السينية) إلى الموجات الطولية مثل (أشعة الراديو) [3]. كما هو موضح في الشكل (1-2):



الشكل (1-2): التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي [4].

إن حوالي 99% من الأشعة الشمسية تقع أطوالها الموجية بين 0.25 إلى $4 \mu m$ وهي موجات قصيرة [3]. أما بقية الإشعاع الشمسي يقدر بحوالي 1% ويكون بشكل أشعة سينية وأشعة غاما وموجات راديوية [5]، كما هي مبينة في الشكل (2-2). ينقسم هذا الطيف إلى ثلاثة أقسام هي:

❖ الأشعة تحت الحمراء:

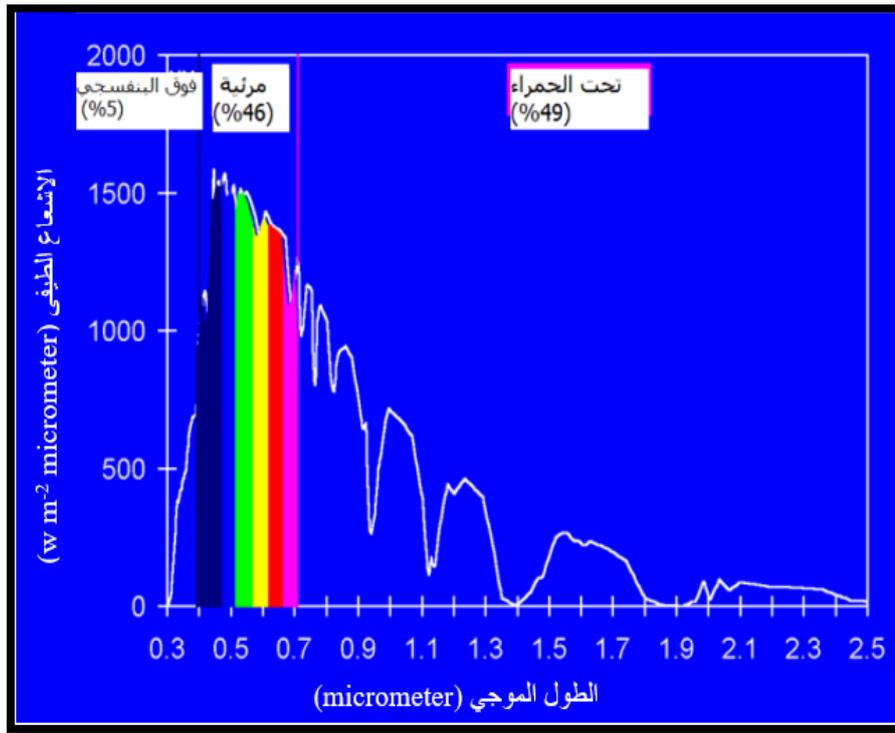
هي الموجات الحرارية تنسب إلى مجموعة الموجات ذات المدى الطويل، حيث تشكل نسبتها حوالي (49%) من مجموع الإشعاع الشمسي [6].

❖ الأشعة المرئية:

هي الضوء المرئي وتشمل حزمة من الأشعة الحمراء والزرقاء والخضراء والصفراء والبنفسجية والبرتقالية، تعتمد عليه النباتات في عملية التركيب الضوئي حيث تشكل نسبتها حوالي (46%) من الأشعة الشمسية [7].

❖ الأشعة فوق البنفسجية:

تكون هذه الأشعة ذات الطول الموجي القصير، وتضم نسبة حوالي (5%) من الأشعة الشمسية، حيث تصبح مفيدة للإنسان إذا وصلت له بكميات قليلة [5].



الشكل (2-2): منحنى طيف الإشعاع الشمسي [1].

3-2 ليزرات الحالة الصلبة:

تلك الليزرات التي يكون الوسط الفعال فيها إما بلورة عازلة أو زجاجا، وهي عبارة عن وسط ضخ للتكبير في منطقة ترددية ضيقة وذلك باستخدام تقنية الانقلاب السكاني [8]. أغلب المواد الفعالة تكون عبارة عن أيونات شائبة داخل البلورات الأيونية في ليزرات الحالة الصلبة، والأيون عادة هو أحد المركبات من سلسلة العناصر الانتقالية في الجدول الدوري مثل Cr³⁺ أو أيونات الأتربة النادرة ومن أبرزها Nd³⁺ [9].

4-2 أيونات الأتربة النادرة والطيف الشمسي:

يعرض هذا الجدول عصابات الامتصاص والإصدار لبعض أيونات الأتربة النادرة [9].

الرمز	العنصر	طول موجة الانبعاث λ_{am} (nm)	طول موجة الامتصاص λ_{ab} (nm)
Pr	Praséodyme	1300	1010
Nd	Néodyme	1060-1300-680	790
Sm	Samarium	1293	488
Dy	Dysprosium	1300	900-800
Er	Erbium	1550	800
Yb	Ytterbium	1000	980-900
Nd: YAG		1060	808
Nd: YVO4		1342-1060	808
Nd/Cr: YAG _{cerami}		1064	600-440

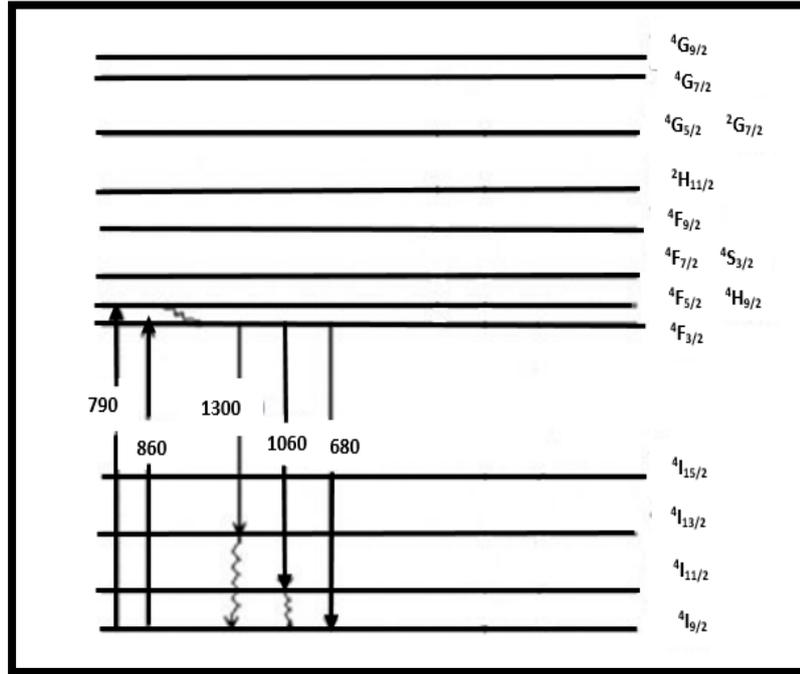
الجدول (1-2): عصابات الامتصاص والإصدار لـ Cr: Nd: YAG في مجال الإشعاع الشمسي الأقصى عند 440nm و 600nm [9].

2-5 ليزرات النيوديميوم:

هناك العديد من الأوساط الصلبة التي يمكن الحصول من خلالها على الليزر، حيث في الماضي استعملت ليزرات الياقوت، أما في الحاضر فقد حلت محلها ليزرات النيوديميوم، لأن ليزر الياقوت يعمل على أساس مخطط ليزر ذو ثلاث مستويات المبدر للطاقة [10]، والتي لا يمكن الحصول من خلالها على خارج ليزر مقابل الطاقة المصروفة لتهييج نصف عدد الذرات المتواجدة في المستوي الأساسي [9]. من بين الليزرات الأكثر شيوعاً هي ليزرات النيوديميوم، لأن أيوناتها لها القابلية على الفعل الليزري عند عدد من الترددات وفي مجموعة متنوعة من البلورات المضيئة [9].

• النيوديميوم Nd³⁺:

النيوديميوم هو من أكثر المواد المعروفة استعمالاً في الليزرات الصلبة، وهو عنصر مهم له القابلية على إنتاج أشعة ذات قدرة عالية في المنطقة تحت الحمراء وفي المناطق المختلفة من الطول الموجي [9]. يسخ النيوديميوم عند الطول الموجي 790 nm تقريباً ويصدر منه عدة أطوال موجية منها 1300nm، 1060nm، 680nm [11]، كما موضح في الشكل (2-3).



الشكل (2-3): مستويات الطاقة والانتقالات الالكترونية للنيوديميوم [11].

- ان نطاقي الضخ الرئيسيين يكون بين المستويات ($^2H_{9/2}$ $^4F_{5/2}$)، $^4I_{9/2}$ ، عند الأطوال الموجية 800nm، 775nm [11].
- المستوي $^4I_{9/2}$ هو المستوي الأساسي.
- مدة الحياة قصيرة جدا في المستويات $^4F_{5/2}$ و $^4H_{9/2}$ ، لذلك يحدث استرخاء للأيونات بسرعة نحو المستوي $^4F_{3/2}$ بانتقال مشع.

الانتقالات الممكنة المشعة لهذا المستوى:

$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	عند الطول الموجي $1.3 \mu m$
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	عند الطول الموجي $1.06 \mu m$
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	عند الطول الموجي $0.68 \mu m$

1-5-2 ليزر Nd: YAG:

يكون فيه الوسط الليزري المضيف عبارة عن بلورة $Y_3Al_5O_{12}$ الذي يطلق عليها في العادة باسم YAG، وكلمة ياغ مقتبسة من الحروف الأولى لكلمات العبارة التالية (yttrium Alummum garnet) الذي فيه قسم من أيونات Y^{+3} التي حلت محلها أيونات Nd^{+3} . إن ليزرات النيوديميوم يمكنها أن تتذبذب عند عدة خطوط، أقوى هذه الخطوط وأكثرها استعمالا هو الخط $\lambda = 1.064 \mu m$ [10].

يبين الجدول (2-2) الخصائص الحرارية لـ (Nd: YAG)، ويلخص الجدول (3-2) بعض الخصائص الفيزيائية والبصرية المهمة لـ (Nd: YAG).

Property	Units	300 K	200 K	100 K
Thermal conductivity	W cm ⁻¹ K ⁻¹	0.14	0.21	0.58
Specific heat	Ws g ⁻¹ K ⁻¹	0.59	0.43	0.13
Thermal diffusivity	cm ² s ⁻¹	0.046	0.10	0.92
Thermal expansion	K ⁻¹ × 10 ⁻⁶	7.5	5.8	4.25
$\partial n/\partial T$	K ⁻¹	7.3 × 10 ⁻⁶	—	—

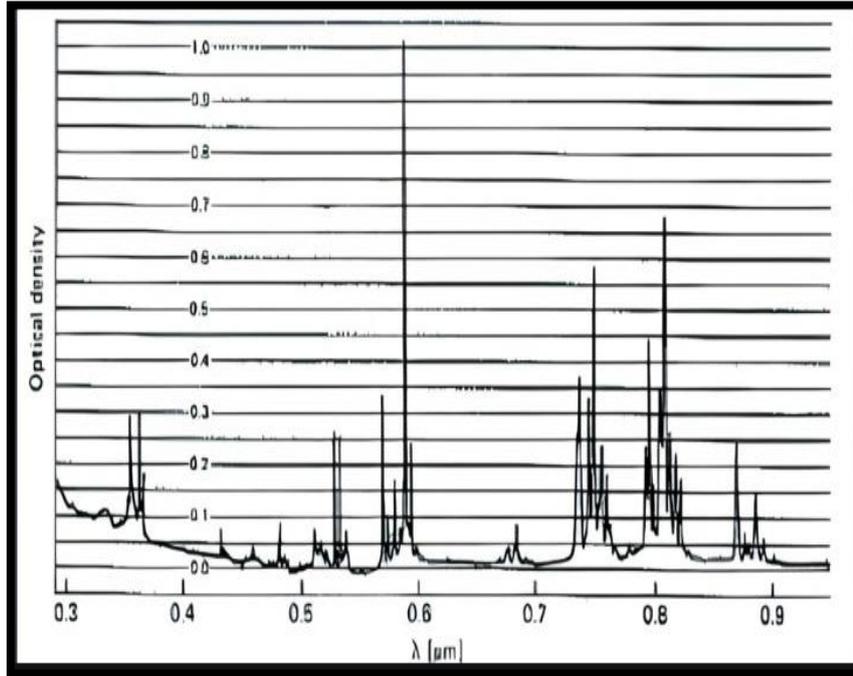
الجدول(2-2): الخصائص الحرارية لـ (Nd: YAG) [4].

Chemical formula	Nd : Y ₃ Al ₅ O ₁₂
Weight % Nd	0.725
Atomic % Nd	1.0
Nd atoms/cm ³	1.38 × 10 ²⁰
Melting point	1970° C
Knoop hardness	1215
Density	4.56 g/cm ³
Rupture stress	1.3–2.6 × 10 ⁶ kg/cm ²
Modulus of elasticity	3 × 10 ⁶ kg/cm ²
Thermal expansion coefficient	
[100] orientation	8.2 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 0–250° C
[110] orientation	7.7 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 10–250° C
[111] orientation	7.8 × 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ , 0–250° C
Linewidth	120 GHz
Stimulated emission cross section	
R ₂ – Y ₃	σ = 6.5 × 10 ⁻¹⁹ cm ²
⁴ F _{3/2} – ⁴ I _{11/2}	σ = 2.8 × 10 ⁻¹⁹ cm ²
Fluorescence lifetime	230 μs
Photon energy at 1.06 μm	hν = 1.86 × 10 ⁻¹⁹ J
Index of refraction	1.82 (at 1.0 μm)

الجدول(3-2): بعض الخصائص الفيزيائية والبصرية المهمة لـ (Nd: YAG) [4].

6-2 طيف امتصاص (Nd: YAG):

يعد التحويل المباشر لأشعة الشمس إلى إشعاع ليزر بواسطة الضخ بالطاقة الشمسية أمراً مهماً [12]، وذلك من خلال امتصاص (Nd: YAG) في حدود نطاق (من 0.3 μm إلى 0.9 μm) [13]، الموضح في الشكل(4-2) وهو الوسط الأكثر شيوعاً نظراً لكفاءته العالية وخواصه الفيزيائية والميكانيكية الممتازة [2].

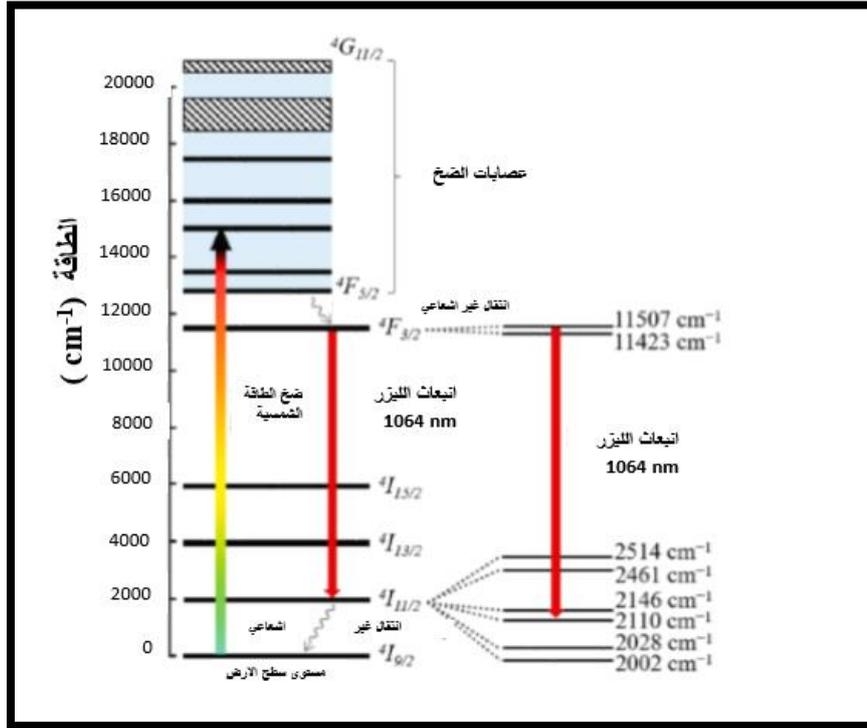


الشكل (4-2): منحنى طيف امتصاص (Nd: YAG) [14].

إن ليزر Nd: YAG يمكنه أن يتذبذب عند عدة خطوط بحيث يكون الانتقال الليزري الأكثر استخداماً لانبعاث هذا الليزر هو الخط $\lambda = 1.064 \mu m$ ، بسبب مكاسبه العالية مقارنة بأطوال موجات انبعاث الليزر الأخرى [10].

الشكل (5-2) يمثل مخطط لمستويات طاقة Nd: YAG وهو عبارة عن نظام رباعي المستويات، هذا يعني أن مستوى الليزر الأدنى أعلى بكثير من المستوى الأرضي ويتم إخلاءه بسرعة من خلال انتقالات الفوتونات المتعددة، مما يؤدي إلى تجنب إعادة امتصاص إشعاع الليزر، وتقليل طاقة الضخ، وبالتالي تسهيل الانبعاث المحفز [10].

يكون الانتقال الليزري عند الخط $\lambda = 1.064 \mu m$ هو الأقوى من بين الانتقالات من $^4F_{3/2}$ إلى $^4I_{11/2}$ ، حيث يرتبط نطاق الضخ الرئيسيين بواسطة الانتقال الغير مشع مع المستوى $^4F_{3/2}$ ، في حين ترتبط السوية السفلى $^4I_{11/2}$ أيضاً بانتقال غير مشع مع المستوى الأرضي $^4I_{9/2}$ [10].

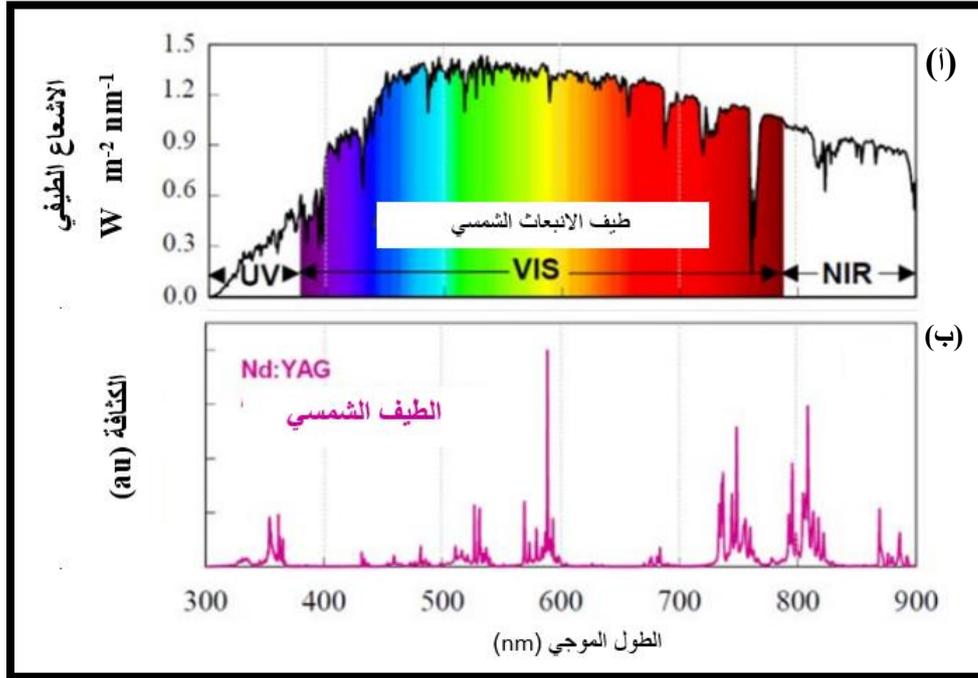


الشكل (5-2): مخطط لمستويات طاقة Nd: YAG [15].

إن ليزر Nd: YAG له مقطع إصدار محرض يقدر ب $\delta = 6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ الموافق للانتقال $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ بينما عمر الإثارة يقدر ب $\tau = 230 \mu\text{s}$ [16].

7-2 التتابق بين طيف امتصاص (Nd: YAG) وطيف انبعاث الشمس:

يوضح الشكل (6-2) طيف امتصاص Nd: YAG مع طيف الإشعاع الشمسي، حيث يحتوي طيف امتصاص Nd: YAG على نطاقات متنوعة تمتد إلى المرئية تتطابق مع طيف الانبعاث الشمسي، حيث بلغت نسبة التتابق بينهما 16% فقط من الطاقة المفيدة، وتعتبر نسبة ضعيفة نسبياً مقارنة بطيف الانبعاث الشمسي [15].

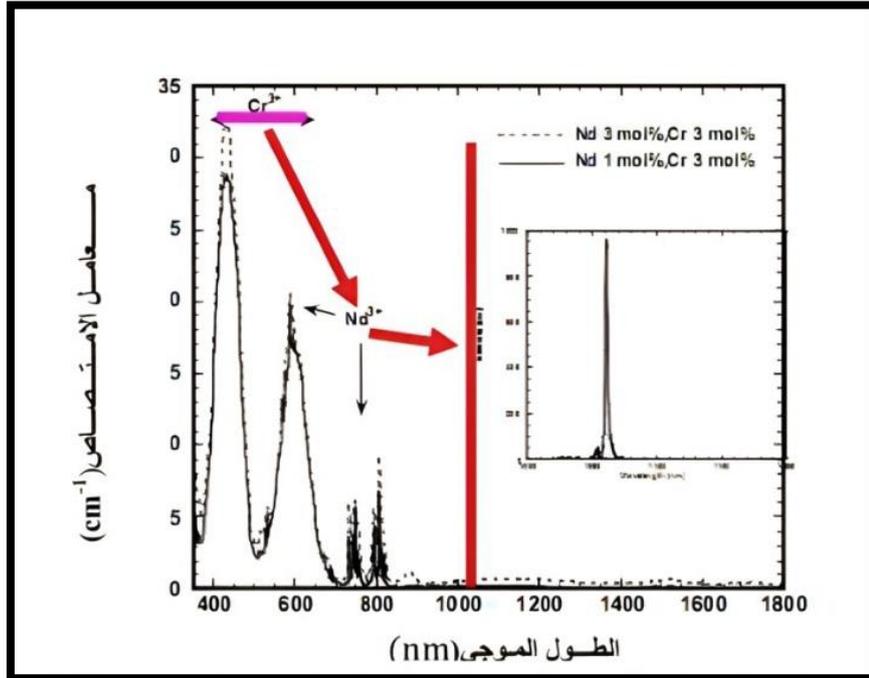


الشكل (6-2): (أ) منحنى طيف انبعاث الشمس، (ب) منحنى طيف امتصاص Nd: YAG [1].

❖ لامتصاص طيف ضوء الشمس بكفاءة عالية يلزم تطعيم ليزر (Nd: YAG) وذلك بإضافة مواد متعددة، من بين هذه المواد أيونات (Cr^{+3})، التي توفر نطاق امتصاص واسع للتداخل مع طيف الانبعاث الشمسي [1].

8-2 التطعيم المضاعف (Cr: Nd: YAG):

للحصول على كفاءة ليزر عالية تم إضافة عنصر الكروم Cr^{+3} إلى الوسط (Nd: YAG) نظراً لكونه يملك نطاق امتصاص واسع في المنطقة المرئية، وذلك من أجل امتصاص المزيد من إشعاع النطاق العريض (طيف انبعاث الشمس)، ونقل طاقة إلى أيونات Nd^{+3} [17].

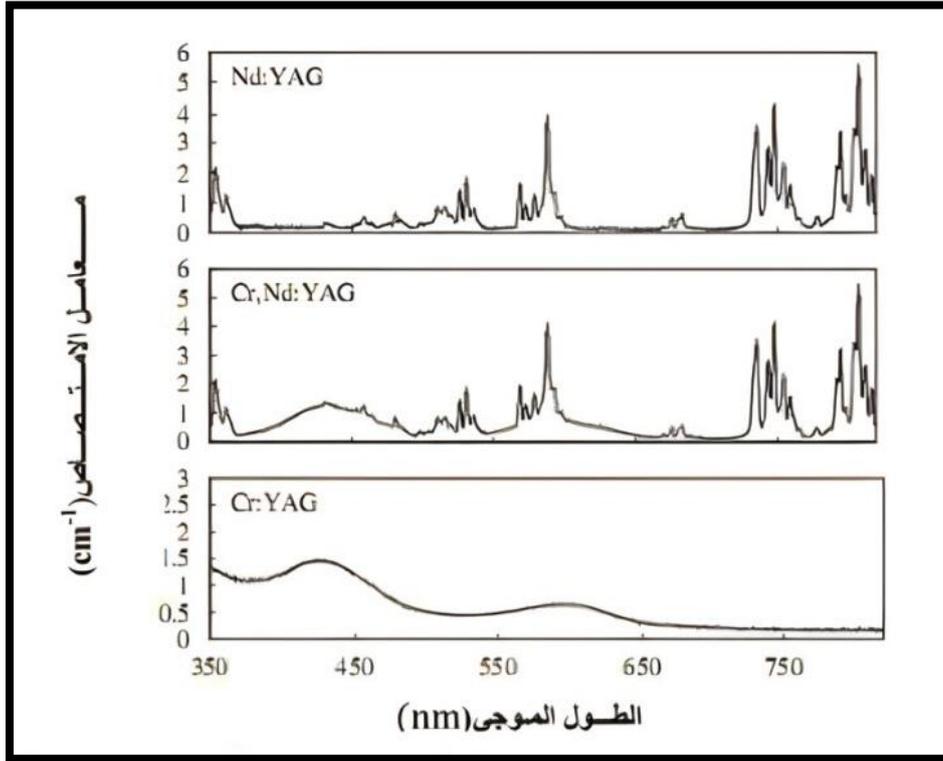


الشكل (7-2): خصائص امتصاص Cr^{+3} و Nd^{+3} والطاقة الممتصة من Cr^{+3} وانتقالها إلى Nd^{+3} [18].

منذ عام 2007م تم تنفيذ عدة محاولات لتحسين كفاءة الليزر الشمسي باستخدام Cr: Nd: YAG تم الإبلاغ عن كفاءة ليزر شمسي قدرها $18.7w/m^2$ عن طريق ضخ الوسط الفعال (Cr: Nd: YAG) وذلك باستعمال عدسة فريزل وبمساحة تجميع $1.3m^2$ [19].

تواصلت الأبحاث حول ذلك إلى أن وصل Liang et al في عام 2017م إلى طاقة ليزر قدرت كفاءتها بـ: $32.5w$ وذلك باستخدام عدسة دليل ضوء سائل سيليكيا مصهورة جديدة هنا لربط الاشعاعات الشمسية المركزة من المنطقة البؤرية لمرآة القطع المكافئ التي بلغت مساحتها $1.0m^2$ ، وقضيب ليزر سيراميك (Cr: Nd: YAG) بقطر $4.5mm$ وطول $35mm$ داخل تجويف ضخ مخروطي، وتحت اشعاع شمسي $870W/m^2$ في منطقة لشبونة [19].

تم قياس طيف الامتصاص عند درجة حرارة الغرفة لكل من Cr: YAG و Cr: Nd: YAG_{cerami} وذلك من خلال طيف امتصاص (Nd^{+3} : YAG) $1.0\%atom$ و ($Cr^{+3}0.1\%atom$) و ($Nd^{+3} 1.0\%atom$) مطعم في YAG و ($Cr^{+3} 0.1\%atom$ مطعم في YAG)، وجد أن لهما نطاق امتصاص واسع عند الطول الموجي $440nm$ والطول الموجي $600nm$ [20]. كما هو موضح في الشكل (8-2).

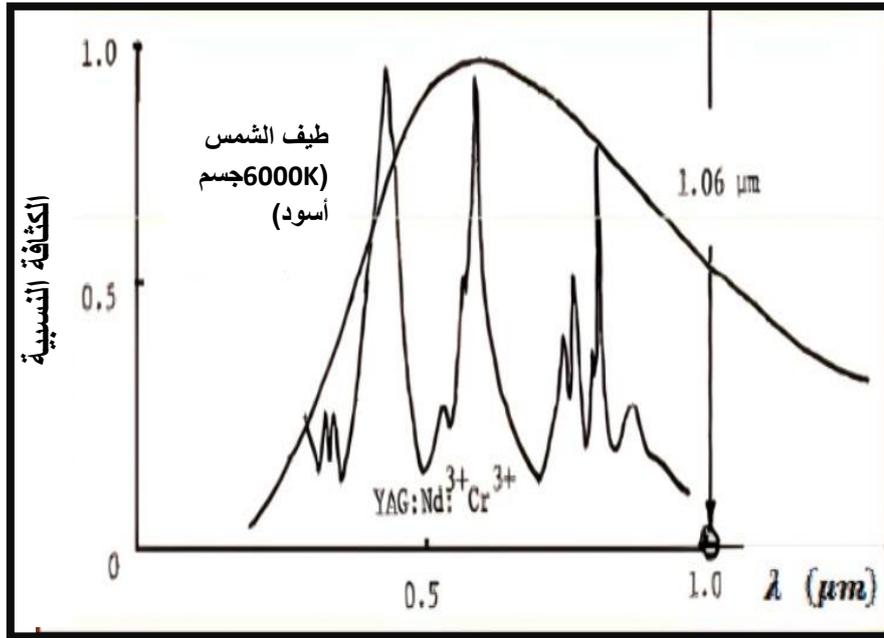


الشكل (2-8): أطياف امتصاص (Nd: YAG) و (Cr: Nd: YAG) و (Cr: Nd) [20].

2-9 التتابق بين طيف الإشعاع الشمسي وطيف امتصاص (Cr: Nd: YAG):

لقد أثبت الوسط النشط Cr: Nd: YAG بالفعل إمكانية زيادة كفاءة أشعة الليزر ذات النطاق العريض، مقارنة بالوسط Nd: YAG نظرا لامتصاصه القوي في الأشعة فوق بنفسجية ومناطق الطيف المرئية لضوء الشمس والشكل (2-9) يوضح ذلك [21].

تعود زيادة كفاءة ليزر Cr: Nd: YAG إلى أن أيون Cr^{+3} له نسبة امتصاص كبيرة نسبيا مطابقة مع الطيف الشمسي، نظرا لأن طاقة الإشعاع الشمسي تتركز أساسا في النطاق المرئي، ولدى أيون Cr^{+3} امتصاص واسع داخل هذا النطاق مع شدة امتصاص قوية. تم إثبات ذلك من طرف kesue et al بأن الكمية الممتصة من الإشعاع الشمسي بواسطة أيون Cr^{+3} كانت أقوى بكثير من كمية أيون Nd^{+3} . في نفس الوقت يتداخل انبعاث أيون Cr^{+3} مع امتصاص أيون Nd^{+3} وهذا ما يزيد من كفاءة ليزر Cr: Nd: YAG، حيث بلغت نسبة تطابقه مع طيف انبعاث الشمس 24% [22].

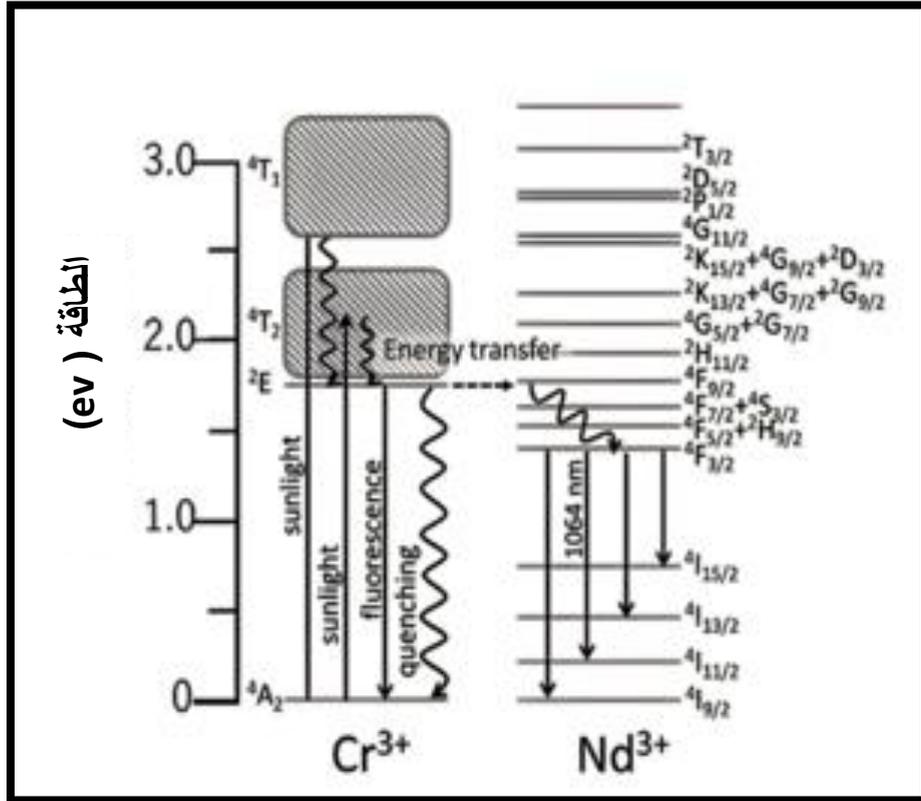


الشكل (9-2): تطابق طيف انبعاث الاشعاع الشمسي مع طيف امتصاص Cr: Nd: YAG [21].

10-2 ميكانيزمات تحويل الطاقة الممتصة من طرف Cr³⁺ إلى Nd³⁺:

تتم عملية نقل الطاقة من Cr³⁺ إلى Nd³⁺ من خلال تسليط ضوء الشمس المركز على أيونات Cr³⁺، بحيث تمتص الكاتيونات هذا الأخير طاقة ضخ وتنتقل من الحالة الأرضية (4A₂) إلى الحالة المثارة (4A₂) إلى 4T₁ و 4A₂ إلى 4T₂ ثم تنتقل إلى مستوى حالة الاسترخاء (2E) لأيونات Cr³⁺. وبعد مدة زمنية قصيرة، يمكن نقل الكاتيونات (انتقالات إشعاعية وغير إشعاعية) [23]، بالنسبة للانتقال الإشعاعي يسترخي جزء من الكاتيونات الموجودة في الحالة المثارة (2E) مباشرة إلى الحالة الأرضية مع تحرير طاقة $h\nu$ لأيونات Cr³⁺ [22].

أما من جهة أخرى تنتقل الكاتيونات المتبقية لأيونات Cr³⁺ إلى مستويات الطاقة العليا لأيونات Nd³⁺ [23] والتي تتمثل في الانتقالات الغير إشعاعية من الحالة (2E) إلى (4F_{3/2}) وهذا ما يزيد كفاءة انبعاث الليزر، ويقلل من قوة عتبة تذبذب الليزر [17]، وبعد ذلك تنتقل الكاتيونات من الحالة (4F_{3/2}) إلى (4I_{11/2}) مع تحرير طاقة $h\nu$ [22].



الشكل (10-2): التحويل الطاقي من Cr³⁺ إلى Nd³⁺ [17].

11-2 الخلاصة:

تم التعرض في هذا الفصل لأهم المواد المطعمة في مجال الليزر المولد بالطاقة الشمسية، في البداية أستعمل (Nd: YAG) ليكون أفضل المواد الليزرية المضخة بالشمس، حيث بلغت نسبة تطابق طيف امتصاصه مع طيف انبعاث الشمس 16% وهي نسبة ضعيفة نسبياً [15]. من خلال هذا تم التطرق إلى التطعيم المضاعف بواسطة أيونات Cr³⁺ لتعريض طيف الامتصاص قصد الحصول على كفاءة ليزر أعلى. وهذا ما سيتم دراسته عن طريق المحاكات في الفصل القادم.

قائمة مراجع الفصل الثاني:

- [1] J. Almeida, D. Liang, D. Garcia, B.D. Tibúrcio, H. Costa, M. Catela, E. Guillot, and C.R. Vistas, "40 W Continuous Wave Ce: Nd: YAG Solar Laser through a Fused Silica Light Guide", *Energies* 2022.
- [2] C.R. Vistas, D. Liang, D. Garcia, M. Catela, B.D. Tibúrcio, H. Costa, E. Guillot, J. Almeida, " Uniform and Non-Uniform Pumping Effect on Ce: Nd: YAG Side-Pumped Solar Laser Output Performance", *Energies* 2022.
- [3] J. Widén ,J. Munkhammar and K. O. Kassem, translation to Arabic by Kh. O. Kassem, "Solar Radiation Theory", Uppsala University, Sweden 12-30,(2021).
- [4] نور الدين حمروني، " ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين "، أطروحة دكتوراه، جامعة الوادي (2021).
- [5] N. Hamani, " Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident " , Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2005.
- [6] محمد خليل، "الطاقة الشمسية واستخداماتها"، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، القاهرة، (2002).
- [7] A.E. Dixon, J.D. Leslie, "Characteristics of Solar Radiation, Solar Energy Conversion", Elsevier -Pergamon Press, Ontario, Canada, 1979.
- [8] بيلا آ. لينكيل، ترجمة فاروق عبودي قيصر (1984)، " الليزرات"، جامعة الموصل، العراق.
- [9] يمينة كرمية، "ضخ الاوساط الفعالة بالإشعاع الشمسي (حالة الليزر)"، مذكرة ماجستير، جامعة الوادي (2013).
- [10] محمد كوسا، "فيزياء الليزر وتطبيقاته"، مطبعة كلية العلوم، منشورات جامعة دمشق، (2006).
- [11] B. Azzedine, " Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares : Application Ampli. Cateur Optique", Thèse de Magister, Centre Universitaire d'El-oued, 2010.
- [12] Sh. Payziyev and Kh. Makhmudov, "A new approach in solar-to-laser power conversion based on the use of external solar spectrum frequency converters", *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY* 8, (2016).
- [13] S. Mehellou, " pompage optique des lasers par faisceau solaire", thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [14] W. Koechner, M. Bass, "Solid State Lasers, Springer-Verlag Inc", New York, (2003).

- [15] B. Tibúrcio, "Solar-Pumped laser technology " Dissertação para optenao Grau de Doutoramento, Universidade nova de Lisboa, Marco, 2022.
- [16] Y. Abdel-Fattah Abdel-Hadi, "Development of optical concentrator systems for directly solar pumped laser systems", thèse de doctorat, Technical University of Berlin, Institute of Optics 2005.
- [18] K. Imasaki, T. Saiki, D. Li, S. Taniguchi, S. Motokosi, and Masahiro Nakatsuka, "SOLAR PUMPED LASER AND ITS APPLICATION TO HYDROGEN PRODUCTION", Institute for Laser Technology, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka, Japan, 2007.
- [19] D. Liang, C.R. Vistas, B.D. Tibúrcio, J. Almeida, " Solar-pumped Cr: Nd: YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency ", Solar Energy Materials and Solar Cells 185, 75–79, (2018).
- [20] H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka, K. Ueda, "The optical properties and laser characteristics of Cr⁺³ and Nd⁺³ co-doped Y₃Al₅O₁₂ ceramics", Japan, Vol 45, No1A, pp. (133-135), 2006.
- [21] S. Fawaz, "PUMPING SYSTEM SOLID STATE LASER BY SOLAR ENERGY", Doctor High institute of laser research and application Damascus University – Damascus – Syria.
- [17] T. Kato, H. Ito, K. Hasegawa, T. Ichikawa, A. Ikesue, S. Mizuno, Y. Takeda, A. Ichiki, and T. Motohiro, " Energy transfer efficiency from Cr⁺³ to Nd⁺³ in Cr, Nd YAG ceramics laser media in a Solar-pumped laser in operation outdoors", Opt.Mater.110,110481,(2020).
- [23] Y. Honda, S. Motokoshi, T. Jitsuno, N. Miyanaga, K. Fujioka, M. Nakatsuka, and M. Yoshida, "Temperature dependence of optical properties in Nd/Cr: YAG materials", J.Lumin, 148, 342–346 (2014).
- [22] T. Li, T. Zhou, Y. Cao, Z. Cai, C. Zhao, M. Yuan, X. Zheng, G. Huang, Z. Wang, LE Zhang, and H. Chen, " Optical properties and energy transfer performances in high quality Cr, Nd: YAG transparent laser ceramics for solar pumped lasers ", Optics Express, vol.30, No.6, pp.12-13,(14 Mar 2022).

الفصل الثالث

محاكاة ومناقشة النتائج

1-3 مقدمة:

يعتبر الليزر الشمسي من مجالات البحث الحديثة التي تعمل على استغلال الطاقة الشمسية باعتبارها طاقة متجددة ومتوفرة ودائمة لإنتاج أشعة ليزرية، حيث يعتمد في مبدأ عمله على تسليط أشعة الشمس المركزة على الوسط الليزري.

نعتمد في هذه الدراسة على وسطين مختلفين هما: Nd: YAG و Cr: Nd: YAG من أجل توفير طاقة ليزر، لذلك سنقوم في هذا الفصل بالمحاكاة العددية باستعمال برنامجي "ZEMAX" و "LASCAD" لنفس منظومة الليزر الشمسي لكن نغير فقط في الوسط الفعال للحصول على استطاعة ليزر ومن ثم المقارنة بينهما.

2-3 الهدف:

يعد الوسط الفعال Nd: YAG الأكثر استعمال في مجال الليزر نظرا لخصائصه الجيدة، لكن ضعف نسبة تطابق طيف امتصاصه مع طيف انبعاث الشمس ضعيف نسبيا (16%). قصد تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي لـ (Nd: YAG) نستعمل التطعيم المضاعف بأيونات Cr^{+3} .

3-3 الإشكالية:

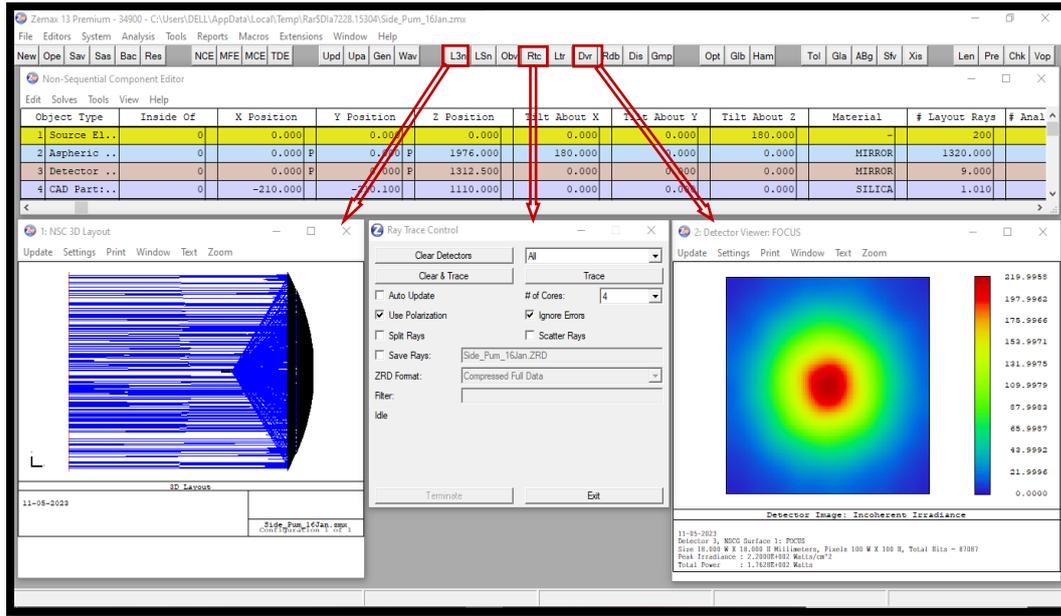
قصد الاستغلال الأمثل لطيف انبعاث الشمس للحصول على أكبر استطاعة ممتصة من طرف الوسط الفعال لمنظومة الليزر الشمسي يستعمل التطعيم المضاعف لـ (Nd: YAG) بأيونات Cr^{+3} الذي ينتج عنه تعريض لطيف امتصاص الوسط الفعال الجديد (Cr: Nd: YAG)، لإنتاج استطاعة ليزر أعلى.

4-3 المحاكاة العددية:

تستعمل في دراسة عملية تحسين منظومة الليزر البرنامجين "ZEMAX" و "LASCAD".

1-4-3 برنامج "ZEMAX" تصميم منظومة الليزر الشمسي:

برنامج تصميم بصري يعمل على أساس تتبع الأشعة والحزم الضوئية ونمذجة الأشعة من خلال نظام بصري. كان أول برنامج تصميم بصري لنظام تشغيل windows تم إصدار الإصدار الأول له سنة 1990م تحت اسم (Max)، والذي تم تغيير اسمه وأصبح في الوقت الحالي بـ "ZEMAX". كما يمكننا هذا البرنامج من تصميم عناصر بصرية مختلفة مثل العدسات العادية والعدسات شبه الكروية والعناصر البصرية التفاضلية والمرآيا، يعمل كذلك على إنتاج رسوم بيانية تحليلية قياسية مثل الرسوم البيانية النقطية والأشعة السينية الجزئية. الجدير بالذكر أن برنامج "ZEMAX" له القدرة على نمذجة الطلاءات الحقيقية على سطح المكونات، كما يمكنه أيضا إجراء تتبع رقمي متسلسل مستمر بين العناصر الضوئية أو التتبع البصري الغير تسلسلي لتحليل الضوء. يحتوي "ZEMAX" على مكتبة للأنظمة الضوئية المختلفة، كما يتيح إضافة عناصر ضوئية إلى مكتبته، تبين الصورة (1-3) واجهة هذا البرنامج [1] [2].



الشكل (3-1): صورة توضح واجهة برنامج ZEMAX.

يحتوي ZEMAX على أنواع مختلفة من النوافذ، كل منهما يستخدم لغرض محدد أهمها:

- **النافذة الرئيسية:** يحتوي شريط النافذة الرئيسية على العديد من رؤوس القوائم كما هو موضح في الشكل (3-2):



الشكل (3-2): صورة توضح النافذة الرئيسية لبرنامج ZEMAX.

- **نوافذ المحرر:** تستخدم هذه النوافذ أساساً لإدخال البيانات.

- **نوافذ النص:** يتم استخدام نوافذ النص لإظهار بيانات نصية مثل بيانات التعليمات والزوايا والبيانات الرقمية.

- **الحوارات:** معظم الحوارات صريحة عادةً، توجد أزرار "موافق" و "الغاء" الشائعة في نوافذ حوار Windows. يمكن نقل جميع النوافذ أو تغيير حجمها (باستثناء نوافذ الحوار) باستخدام الأمر القياسي للفأرة أو لوحة المفاتيح.

1-1-4-3 المصادر (Sources):

هي الكائنات المستخدمة لإصدار أشعة المحاكاة، وبالتالي تمثل مصادر الضخ. وهي ضوء الشمس في منظومة الليزر الشمسي.

2-1-4-3 العناصر البصرية الهندسية (geometric optical elements):

تحدد المكونات الضوئية التي يتم فيها امتصاص الأشعة المنبعثة، وانكسارها، وانعكاسها، وانحرافها، وتشتتها، وتقسيمها، وما إلى ذلك وفقا للمادة في قائمة التحرير لكل مكون غير متسلسل. تمثل هذه الكائنات في هذه الحالة مكونات نظام تجميع وتركيز الطاقة الشمسية ومكونات رأس الليزر، والشكل (3-3) يوضح ذلك.

Object Type	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material
1 Source EL..	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	180.000	-
2 Aspheric ..	0	0.000	0.000	1976.000	180.000	0.000	0.000	MIRROR
3 Detector ..	0	0.000	0.000	1312.500	0.000	0.000	0.000	MIRROR
4 CAD Part..	0	-210.000	-210.100	1110.000	0.000	0.000	0.000	SILICA
5 Detector ..	0	0.000	0.000	1241.000	0.000	0.000	0.000	MIRROR
6 Rectangul..	0	0.000	0.000	1217.000	0.000	0.000	90.000	SILICA
7 Rectangul..	0	-21.000	0.000	1234.800	0.000	90.000	0.000	WATER
8 Rectangul..	0	0.000	0.000	1231.390	0.000	0.000	90.000	MIRROR

الشكل (3-3): صورة توضح مواد مختلفة في تحرير المكون الغير متسلسل.

3-1-4-3 كائنات الكاشفات (detectors):

تحدد المعلومات النوعية والكمية للأشعة الواردة بواسطة هذه الكاشفات، وهما نوعان كاشف مستطيل وكاشف حتمي.

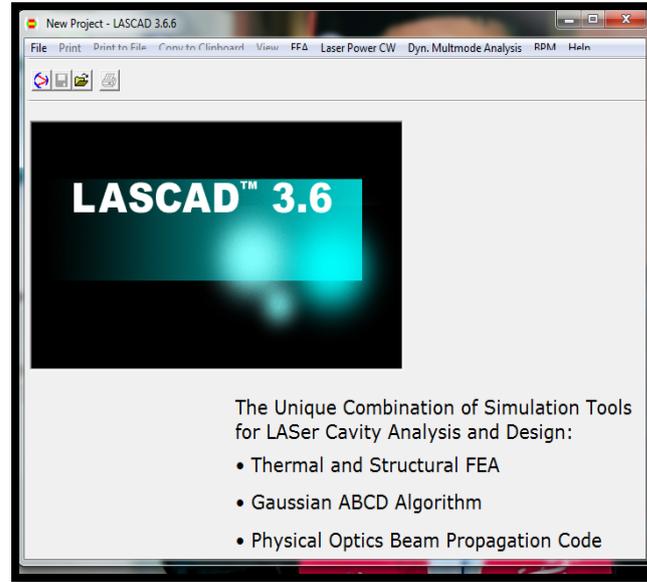
4-1-4-3 تحليل طاقة الضخ الممتصة:

من الضروري استخدام كائنات الكاشف في "ZEMAX" لمعرفة المعلومات من طاقة الضخ الواردة أو الممتصة، مثل اكتشاف المعلومات العديدة في بؤرة المركز أو لأي عنصر من عناصر المنظومة. عادةً ما يستخدم الكاشف المستطيل، حيث يسمح بتسجيل قدر أكبر من البيانات، مثل ملف تعريف الطاقة الواردة أو الممتصة في المنطقة وتوزيع طاقة ثنائي الأبعاد وملف تعريف الطاقة الواردة أو الممتصة في المنطقة التي يحددها الكاشف. يمكن وضع هذا النوع من الكاشفات إما 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 للكاشف، مع مراعاة التأثير على إجمالي الوقت المطلوب لكل محاكاة. كما يتم أيضا استخدام كاشف حتمي لتحليل طاقة الضخ الواردة أو الممتصة داخل الوسط الفعال، ومن الممكن إضافة بعد جديد للحصول على معلومات الطاقة نظرا لأنه يحتوي على شكل متوازي السطوح، حيث يتم تحديد أبعاده من قبل المستخدم، وكذلك عدد وحدات الفوكسل (نقاط حجمية).

LASCAD 2-4-3 محاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي:

يتيح برنامج LASCAD الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنان الليزر الشمسي كتحليل العناصر الحرارية والبنوية المتناهية (FEA)، دليل الانتشار للحزمة الغاوسية ABCD، وخوارزمية انتشار الحزم الغير غاوسية - طريقة انتشار الحزمة (BPM)، وبالتالي من الممكن نمذجة تجاويف الرنين من

خلال تحليل: تأثيرات العدسة الحرارية، والتي تعد واحدة من المشاكل الرئيسية في ليزر الحالة الصلبة، طاقة خرج الليزر متعدد الأنماط و TEM_{00} وكفاءة 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 وربح التشبع [1]. والشكل (4-3) يوضح ذلك.

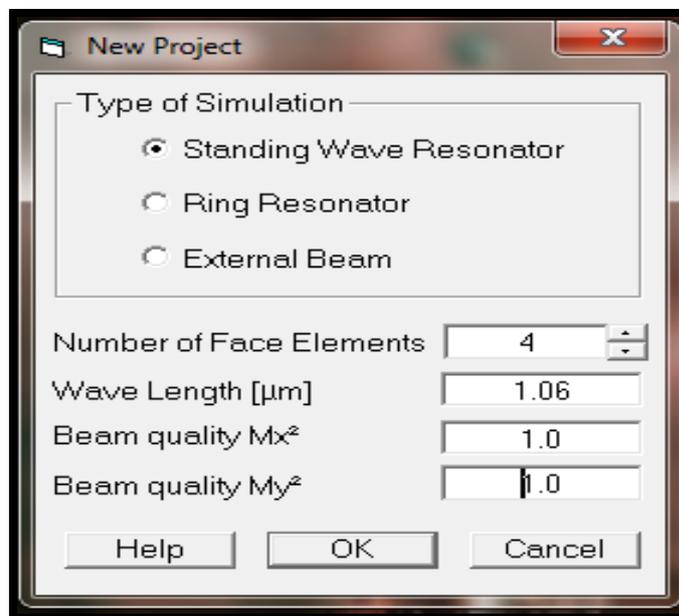


الشكل (4-3): صورة لواجهة برنامج LASCAD.

من خلال الشكل (4-3) قمنا باتباع المراحل التالية من أجل المحاكاة:

✓ المرحلة الأولى:

نقوم بالضغط على أيقونة فتح مشروع جديد الموجودة في واجهة البرنامج، وبعد ذلك نحدد عدد العناصر المكونة للمرنان كما يوضح الشكل (5-3).

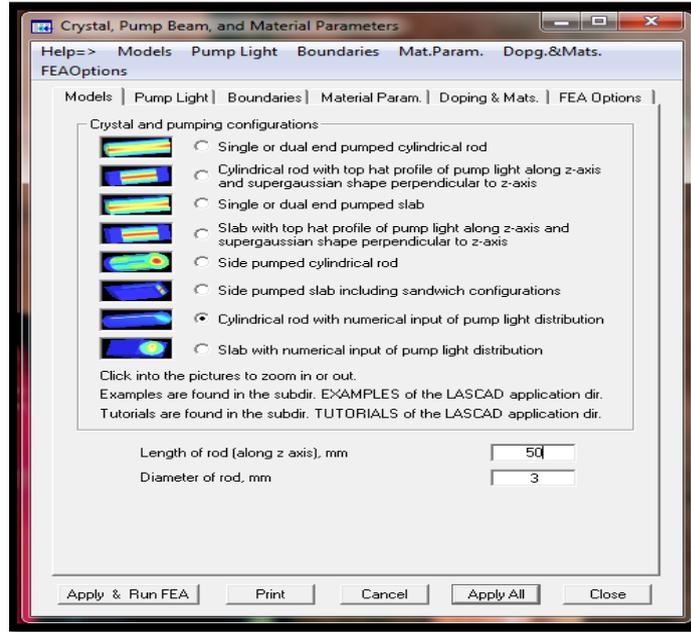


الشكل (5-3): نافذة لتحديد العناصر المكونة للمرنان.

✓ المرحلة الثانية (طريقة العمل):

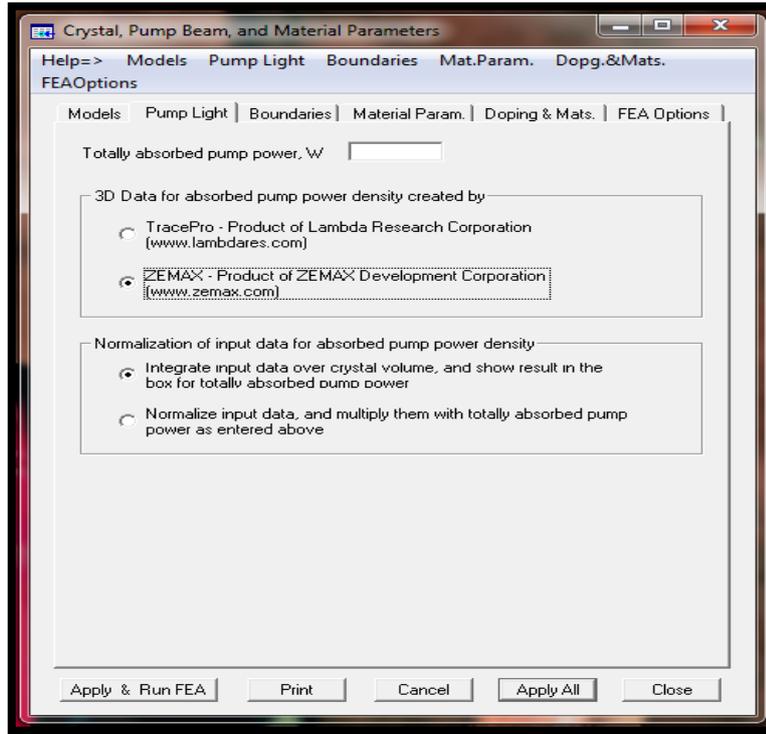
بعد هذه المرحلة نقوم بالضغط على (FEA) لإدخال المعطيات الخاصة بالمرنان، تظهر نافذة مكونة من عدة خيارات:

- خيار الأول (Models): نحدد فيها شكل الوسط الفعال (أسطوانة) والتوزيع العددي للاستطاعة الممتصة (المخزنة كنص عددي من برنامج ZEMAX)، ونحدد طول وقطر الوسط الفعال، كما يوضحه الشكل (6-3).



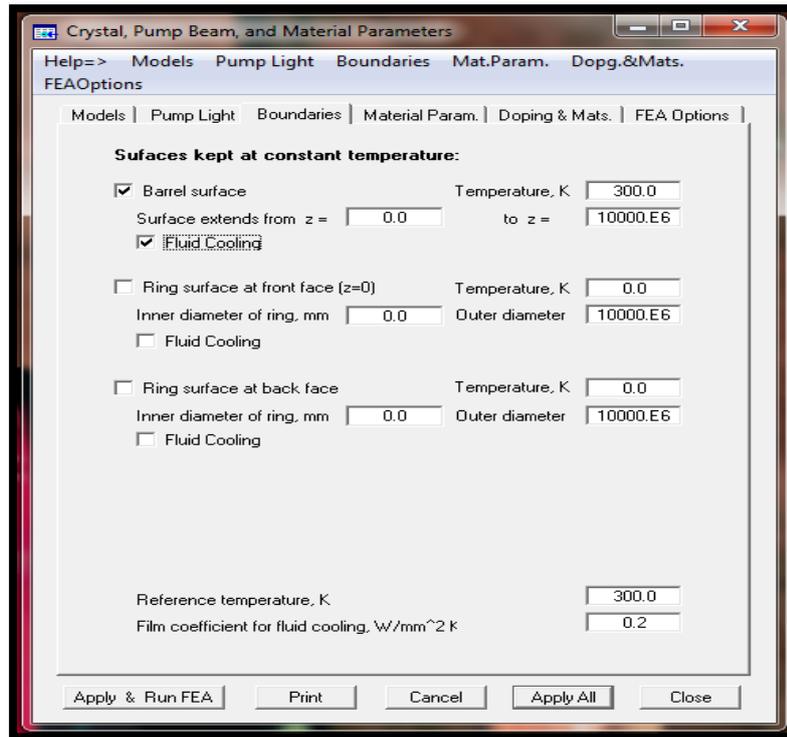
الشكل (6-3): نافذة لتحديد شكل وبعد وقطر الوسط الفعال.

- الخيار الثاني (Pump Light): تحديد مصدر النص العددي الذي يمثل توزيع الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال، كما في الشكل (7-3).



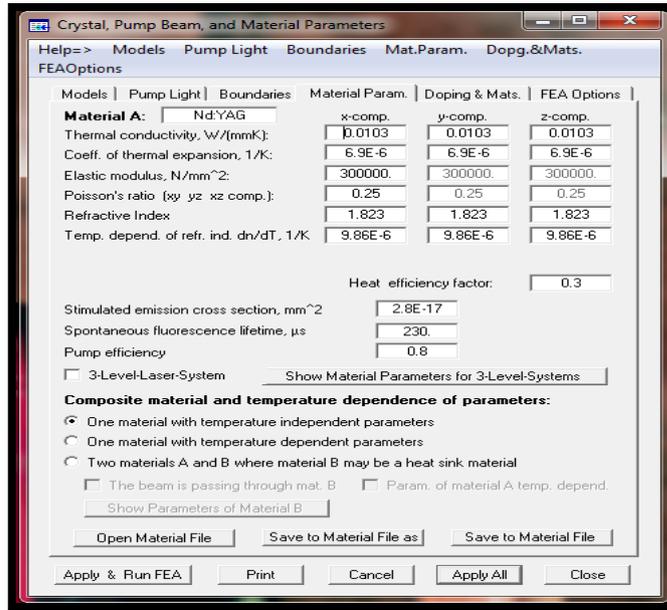
الشكل (7-3): نافذة لتحديد النص العددي.

- الخيار الثالث (**Boundaries**): تحديد درجة حرارة الغرفة (انطلاقاً منها ينتج لنا توزيع درجة حرارة الوسط الفعال)، والشكل (8-3) يوضح ذلك.



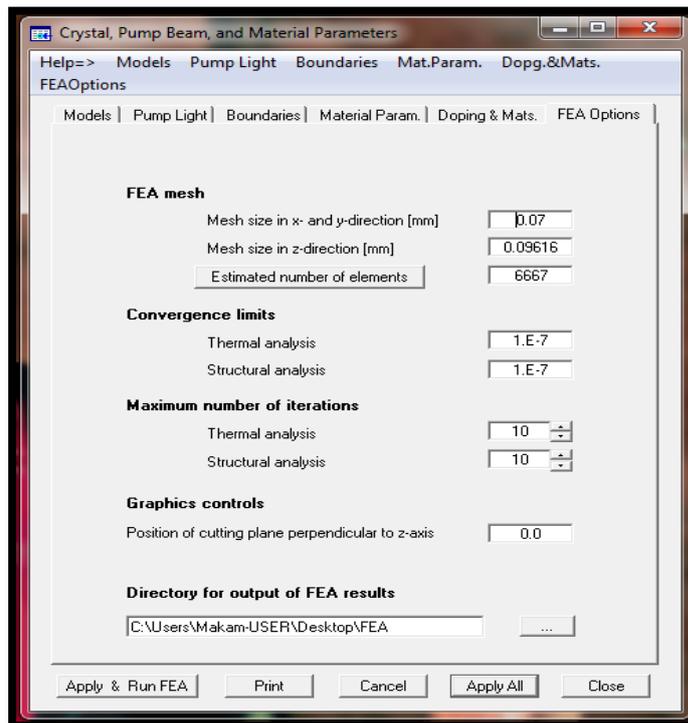
الشكل (8-3): نافذة لتحديد متغيرات درجة حرارة الوسط الفعال.

- الخيار الرابع (Material Param): تحديد مادة الوسط الفعال (Nd: YAG)، وإعطاء قيم كبيرة للمادة المضيفة YAG (لكي يكون كل الوسط الفعال مطعم). كما يوضح الشكل (9-3).



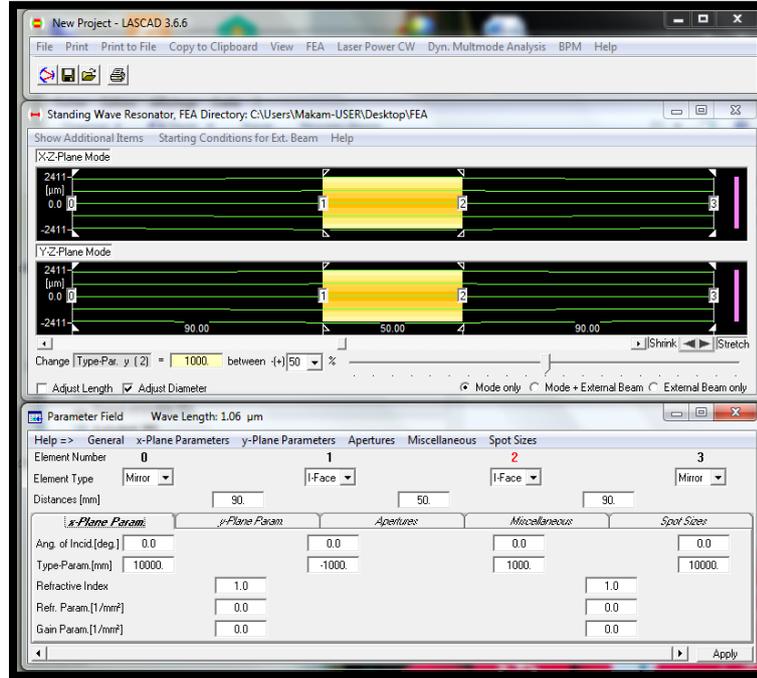
الشكل (9-3): نافذة لتحديد متغيرات مادة (Nd: YAG).

- الخيار الأخير (FEA options): تحميل ومعالجة الملف النصي بواسطة أيقونة FEA. كما هي موضحة في الشكل (10-3).



الشكل (10-3): نافذة تحميل ومعالجة النتائج.

بعد المرور بجميع المراحل السابقة تمكن برنامج "LASCAD" من تحديد قياسات المرنان (نصف قطر انحناء المرايا، الأبعاد بين المرايا والوسط الفعال)، والشكل (11-3) يوضح ذلك.

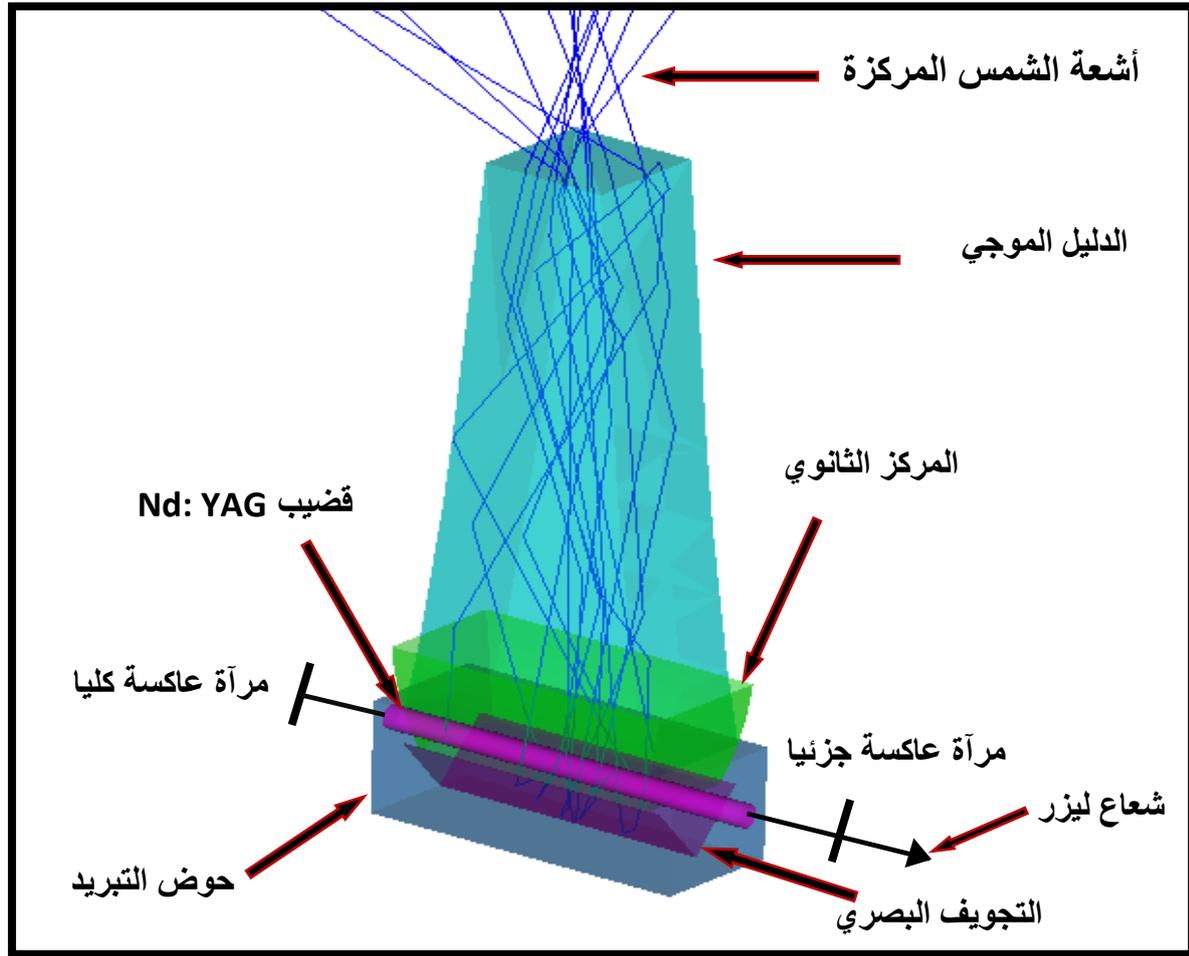


الشكل(11-3): تجويف الرنين وشعاع الليزر المنتشر في المستويات X-Y-Z .

5-3 منظومة الليزر الشمسي:

تتكون منظومة الليزر الشمسي التي سنقوم بمحاكاتها ببرنامج "ZEMAX" من العناصر التالية والموضحة في الشكل (12-3):

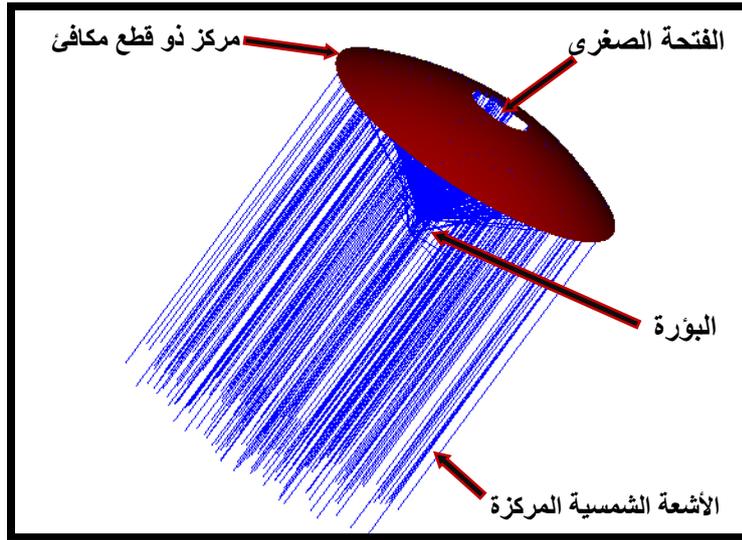
- ❖ المركز الأولي (مركز ذو القطع المكافئ).
- ❖ الدليل الموجي.
- ❖ المركز الثانوي.
- ❖ الوسط الفعال (Nd: YAG).
- ❖ التجويف البصري.
- ❖ حوض التبريد (الماء).
- ❖ التجويف الرنيني.



الشكل (3-12): رسم تخطيطي لمنظومة الليزر الشمسي.

1-5-3 المركز الأولي (مركز القطع المكافئ):

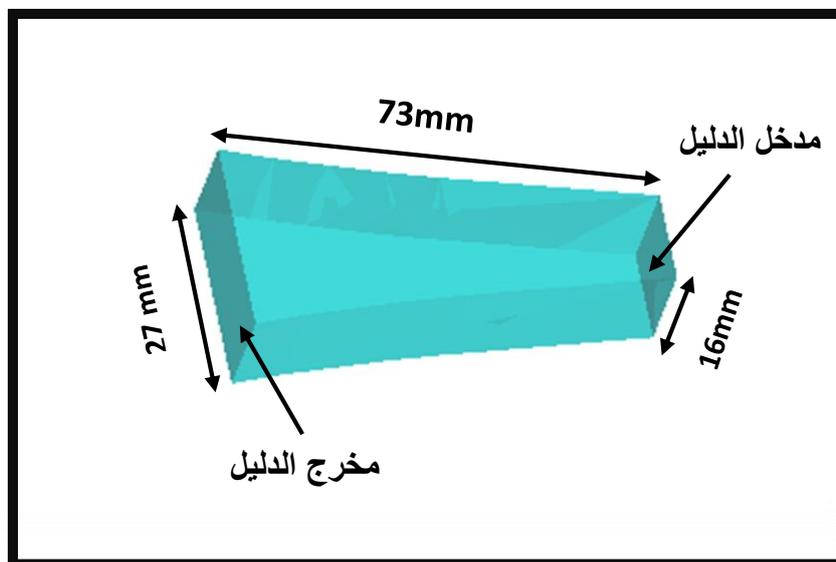
هذه الدراسة تم العمل باستخدام المركز ذو القطع المكافئ لقدرته العالية على التركيز مقارنة ببقية المركزات الأخرى، وهو عبارة على سطح عاكس مقعر لالتقاط أشعة الشمس وتجميعها وتركيزها في البؤرة، حيث يتميز عن غيره من المركزات بإمكانية التجميع والتركيز في آن واحد وذو تركيز عالي. نصف قطر هذا المركز ($D=750\text{mm}$)، تتوسطه فتحة نصف قطرها ($D'=150\text{mm}$) 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 (3-13).



الشكل (3-13): رسم تخطيطي يوضح الأشعة الشمسية المركزة بواسطة المركز ذو القطع المكافئ.

3-5-2 الدليل الموجي:

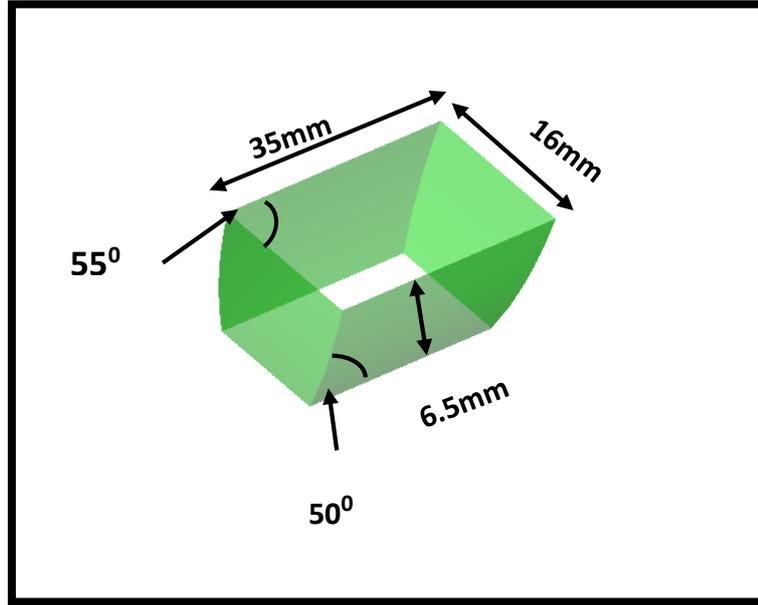
عبارة عن قناة مصنوعة من زجاج السيليكا الذي يمتاز بنقاوة بصرية عالية وشفافيته للطول الموجي الذي يمتصه النيوديميوم، حيث تخضع الأشعة بداخله لمبدأ الانعكاس الكلي اعتماداً على اختلاف قرينة الانكسار بين المادة الفعالة والهواء. يتمثل دور هذا الدليل الموجي في نقل الأشعة المركزة من البؤرة إلى الوسط الفعال مع الحفاظ عليها من التشتت، ويتم اختيار شكل الدليل على حسب نوع التركيز (نقطي أو خطي) وطريقة الضخ. بما أنه استخدم المركز ذو القطع المكافئ، وطريقة الضخ الجانبي للوسط الفعال (Nd: YAG) اخترنا دليل موجي يتناسب مدخله مع قطر بؤرة المركز الشمسي قدره (16mm)، ومخرجه مع طول الوسط الفعال الذي قدر بـ: (27mm)، وطوله (73mm)، والشكل (3-14) يوضح ذلك.



الشكل (3-14): رسم تخطيطي لدليل موجي.

3-5-3 المركز الثانوي:

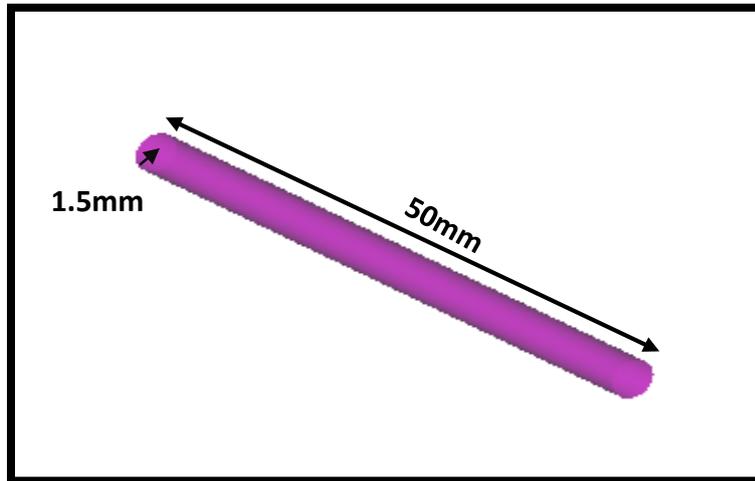
عبارة على مرآيا من نوع 2D-CPC التي تتميز بإعادة الانتشار الجيد للإشعاعات المتشتتة على الوسط الفعال. بينما يستخدم هذا المركز لإعادة توجيه وتركيز الأشعة المتشتتة النافذة من الدليل الموجي، الذي يتناسب مدخله مع مخرج الدليل الموجي ومخرجه مع طول الوسط الفعال (Nd: YAG) للمنظومة، كما هو موضح في الشكل (15-3).



الشكل(15-3): رسم تخطيطي للمركز الثانوي.

4-5-3 الوسط الفعال:

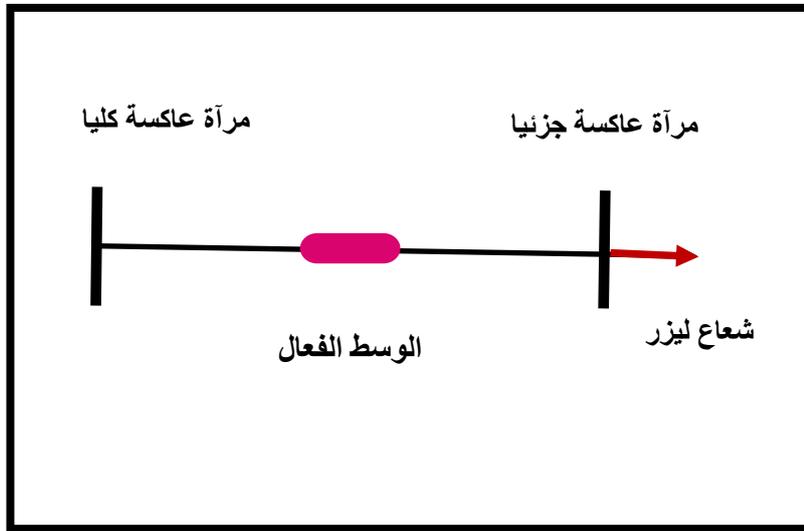
الوسط الفعال الأكثر استعمالاً في منظومة الليزر الشمسي هو (Nd: YAG) والمكون من بلورة YAG (Yttrium Aluminum Garnet) مطعمة بأيونات Nd^{+3} والتي تعتبر من عناصر الأتربة النادرة بحيث يمكنها امتصاص الأشعة الشمسية. كما يتميز بموصلية حرارية K عالية نسبياً تقدر بـ $K=14w/m.k$ وأبعاد الوسط الفعال المستخدم في هذه الدراسة ذو نصف قطر (1.5mm) وطول (50mm).



الشكل(16-3): رسم تخطيطي يوضح ابعاد الوسط الفعال.

3-5-5 التجويف الرنيني:

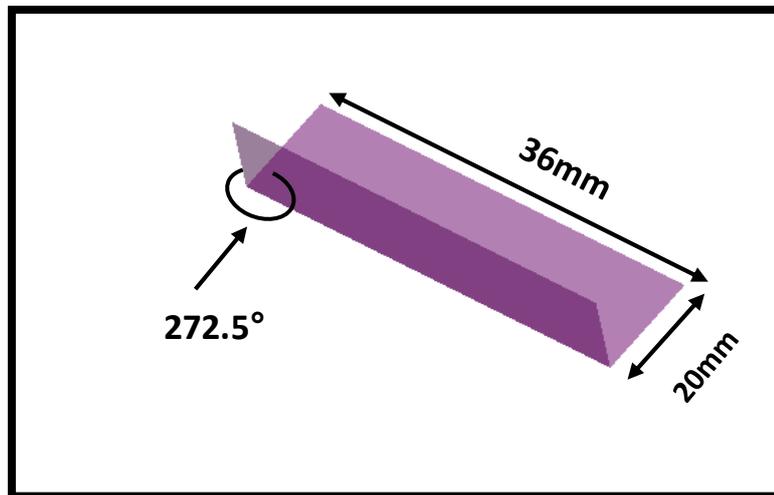
التجويف الرنيني أو ما يسمى بالمرنان، وهو منظومة تتكون من مرآتين توضع على محور بصري مشترك مع الوسط الفعال، حيث تنتقل الفوتونات بين المرآتين ذهابا وإيابا مرورا بالوسط الفعال من أجل تضخيمها. تكون إحدى المرآتين ذات انعكاسية كلية بينما تكون المرآة الثانية ذات انعكاسية جزئية، كما هو موضح في الشكل (3-17).



الشكل (3-17): رسم تخطيطي للمرنان.

3-5-6 التجويف البصري:

لكي نضمن توزيع الأشعة على كامل جوانب الوسط الفعال وتفادي ضياعاتها نستعمل تجويف بصري على شكل حرف V، وهو عبارة عن مرآتين عاكستين. الشكل (3-18) يوضح أبعاد كل مرآة (20mm, 36mm) والزاوية المحصورة بينهما (272.5°).



الشكل (3-18): رسم تخطيطي يوضح التجويف البصري.

7-5-3 حوض التبريد:

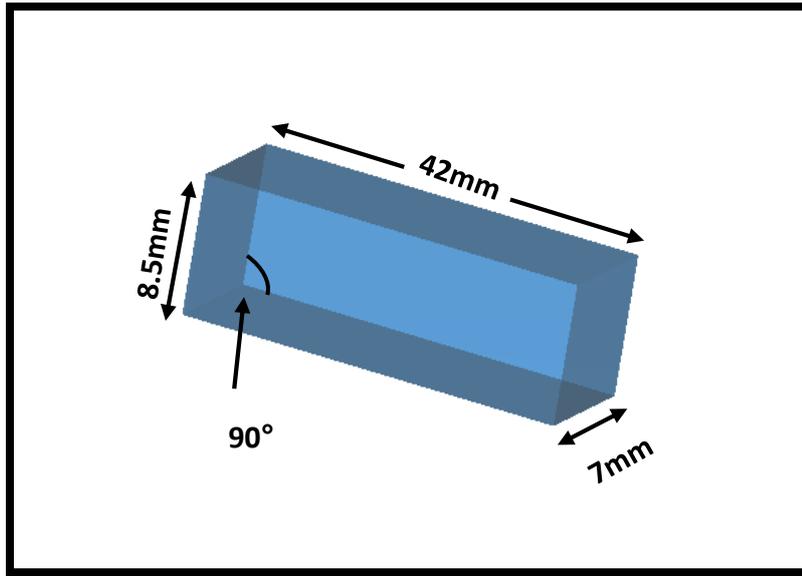
ترتفع درجة حرارة الوسط الفعال عند توليد أشعة الليزر وهذا ناتج عن الانتقالات الغير مشعة والتي تكون مصحوبة بانتشار حرارة، ولتفادي تلفه يجب التخفيض من درجة حرارته ويكون بواسطة عملية التبريد والشكل (19-3) يوضح أبعاد الحوض:

البعد على المحور X ($L_x=7mm$).

البعد على المحور Y ($L_y=8.5mm$).

البعد على المحور Z ($L_z=42mm$).

الزاوية المحصورة بينهما (90°).



الشكل(19-3): رسم تخطيطي يوضح حوض التبريد.

6-3 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي:

حتى نتمكن من حساب الاستطاعة نستعمل الكواشف ونضعها في النقاط التي نريد حساب الاستطاعة فيها، حيث نضع أولا كاشفا في بؤرة المركز (لقياس الاستطاعة المركزة)، وعند مخرج الدليل الموجي (لقياس الاستطاعة المنقولة بواسطة الدليل) وحول الوسط الفعال (لقياس الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال).

1-6-3 نتائج المحاكاة العددية ببرنامج ZEMAX:

1-1-6-3 حساب الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Nd: YAG):

لمعرفة نسبة الاستطاعة الممتصة تم محاكاة ضوء الشمس ببرنامج "ZEMAX"، حيث تأخذ طاقة الضخ الفعالة لمصدر الضوء في الاعتبار التداخل بنسبة % 16 بين طيف الامتصاص للوسط (Nd: YAG) والطياف الشمسي [3]، علما أن انعكاسية كل مرآة مكافئة خارج المحور تقدر بـ % 95، ومركز ذو قطع مكافئ مساحته ($1.77 m^2$). كما تم اعتبار الإشعاع الشمسي الأرضي البالغ ($950w/m^2$)، ونستعمل مصدر طاقة يقدر بـ ($255w$) حيث تم حسابها بالطريقة التالية:

$$950 \times (1.77) = 1.68 \text{ W}$$

تمثل هذه القيمة (1.68w) الاستطاعة المجمعة.

$$1.68 \times (95/100) = 1597.42 \text{ w}$$

القيمة (1597.42w) تمثل الاستطاعة المجمعة بعد خصم نسبة الضياعات.

$$1597.42 \times (16/100) \approx 255 \text{ w}$$

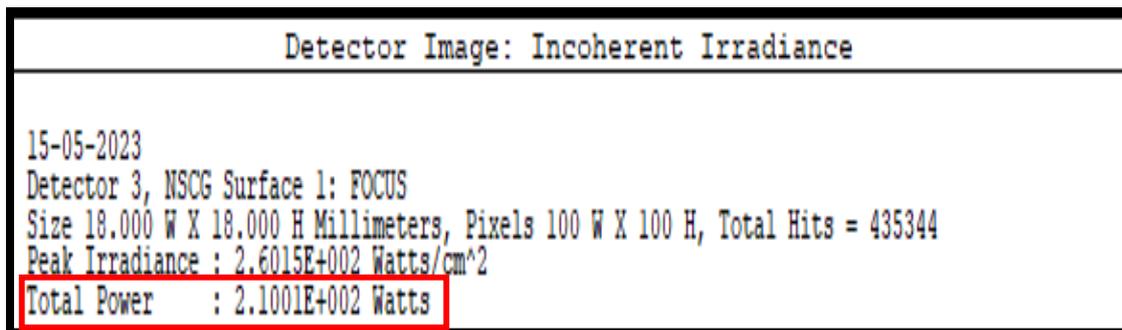
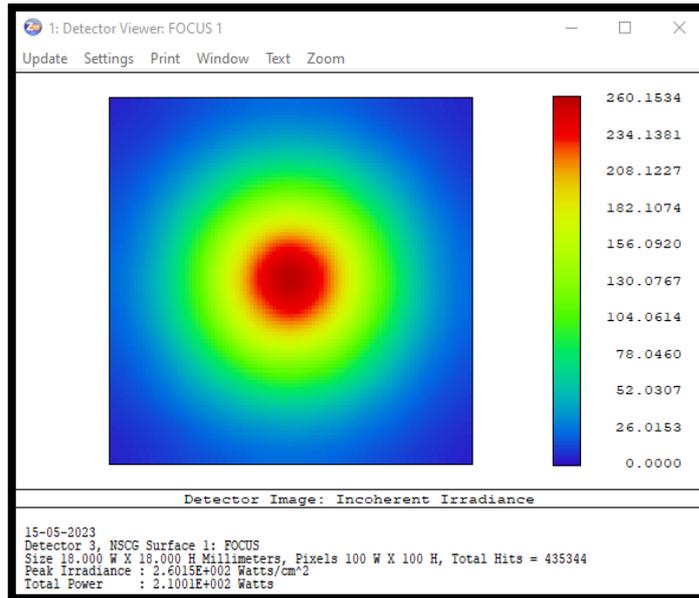
$$P=255 \text{ w}$$

ومنه

تم وضع العديد من الكواشف في أماكن محددة من النظام لتكون قادرة على قياس الاستطاعة الضوئية عند هذه النقاط:

• الاستطاعة الضوئية عند بؤرة المركز (الكاشف السطحي الأول):

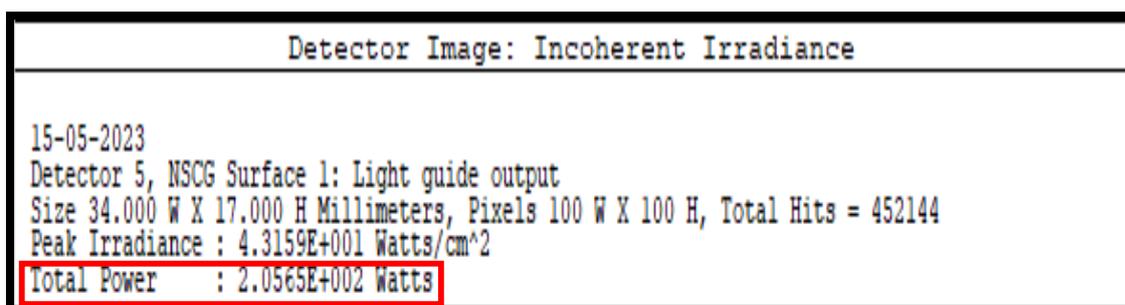
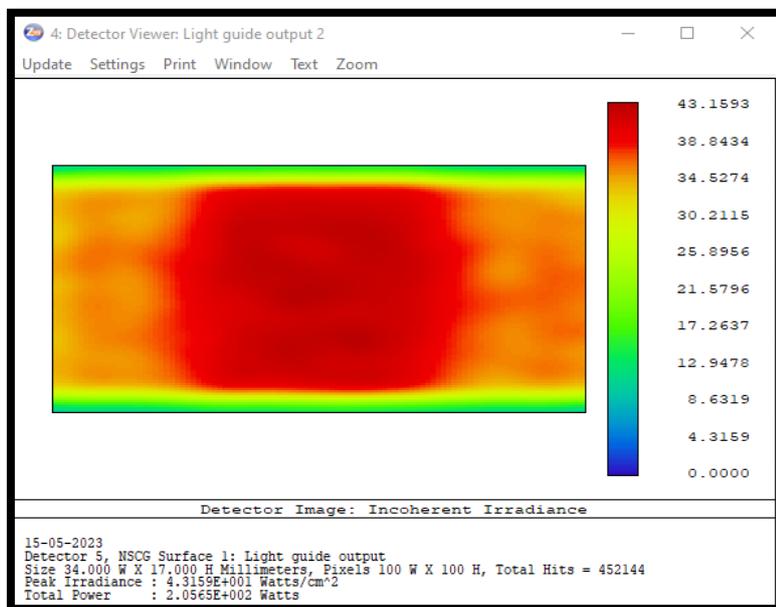
باستعمال مصدر طاقة (255w) ومركز ذو قطع مكافئ مساحته (1.77 m²) وكاشف ضوئي في بؤرة المركز تمكنا من قياس الطاقة الشمسية المركزة في هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها وهذا بعد عمليات تحسين عديدة. توصلنا إلى قيمة الاستطاعة المركزة في البؤرة تساوي (210.01w) كما يظهر في الشكل (3-20).



الشكل (3-20): رسم تخطيطي للكاشف الضوئي في بؤرة المركز.

• الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي (الكاشف السطحي الثاني):

بعد مرور الإشعاعات عبر الدليل الموجي قمنا بقياس الاستطاعة عند نهايته، بواسطة كاشف سطحي ثاني، قدرت بـ: 205.65w كما يوضح الشكل (3-21).



الشكل (3-21): مقطع عرضي لتوزيع الاشعاع الشمسي المركز عند مخرج الدليل الموجي.

نلاحظ أن هناك تناقص في قيمة الاستطاعة من: 210.01 w إلى 205.65 w، ومنه نستطيع حساب كفاءة نقل الأشعة للدليل الموجي بالعلاقة التالية:

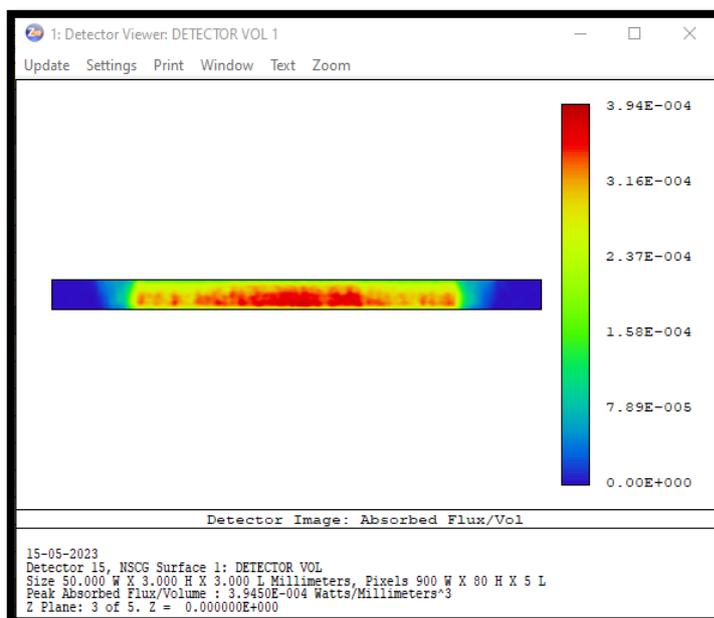
$$205.65/ 210.01= 98\%$$

يرجع هذا التناقص في قيمة الاستطاعة إلى الضياعات داخل الدليل الموجي (الامتصاص، الانعكاس الداخلي غير تام).

• قياس الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال (Nd: YAG) وتوزيعها (الكاشف الحجمي):

لقياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الليزري ومعرفة طريقة توزيعها على طول الوسط الفعال (Nd: YAG) يمكننا برنامج ZEMAX من استعمال الكاشف الحجمي الذي يغطي جميع نقاط الوسط

الفعال، والذي يقيس قيمة الاستطاعة الممتصة في نقاط حجمية (الفوكسل) من الوسط الفعال، كما يوضح الشكل (22-3).



الشكل (22-3): رسم تخطيطي لكاشف ضوئي على طول الوسط الفعال (Nd: YAG).

من خلال الشكل (22-3) لا يمكن معرفة قيمة الأشعة الممتصة لذا نضغط على Text ليتم تخزينه كنص رقمي ثم يفتح بواسطة برنامج Excel ، حيث يحتوي هذا النص على الاستطاعة الممتصة عند كل نقطة حجمية من النقاط الحجمية للوسط الفعال، ثم نقوم بجمع هذه الاستطاعات لنتحصل على الاستطاعة الكلية وبالتالي نتحصل على استطاعة ممتصة تقدر بـ: 50.1 w كما هي موضحة في الشكل (23-3).

Absorbed/Flux	Absorbed Flux	Incident	Center Z	Center Y	Center X	Voxel
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3
			7.29E-07	9.12E-10	1.91E-02	1132
			1.14E-06	1.43E-09	2.04E-02	1133
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	359999
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	360000
			5.01E+01			

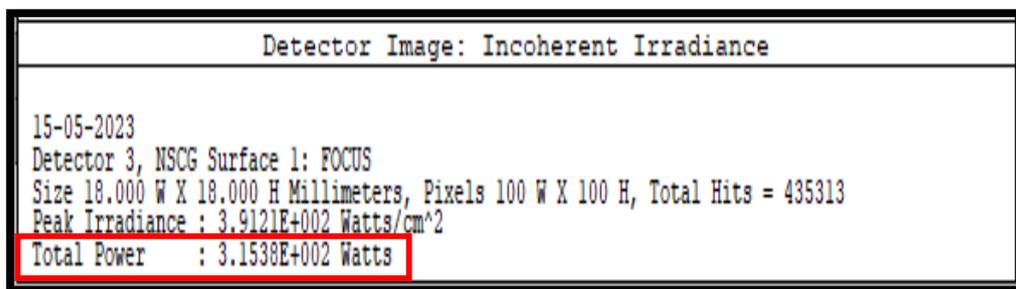
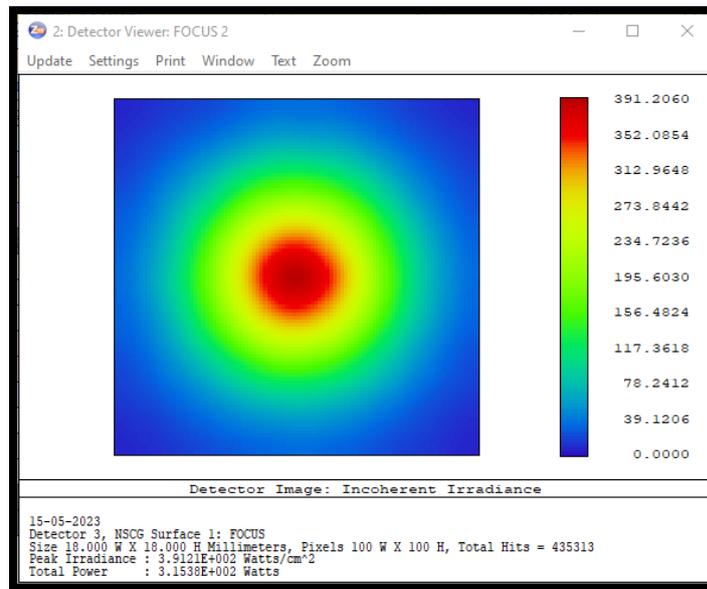
الشكل (23-3): نتيجة الاستطاعة الممتصة الكلية للوسط الفعال (Nd: YAG) باستخدام برنامج Excel.

2-1-6-3 حساب الاستطاعة من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG):

بنفس الطريقة تمت محاكاة الطاقة الشمسية الواردة ولكن تأخذ طاقة الضخ الفعالة لمصدر الضوء في الاعتبار التداخل بنسبة 24% بين طيف الامتصاص للوسط (Cr: Nd: YAG) والطيف الشمسي [4]، وانعكاسية كل مرآة مكافئة خارج المحور تقدر بـ 95%، ومركز ذوق قطع مكافئ مساحته (1.77 m²). كما تم اعتبار الإشعاع الشمسي الأرضي البالغ (950w/m²)، حيث قدرة نسبة الاستطاعة في هذه الدراسة بـ: 383w.

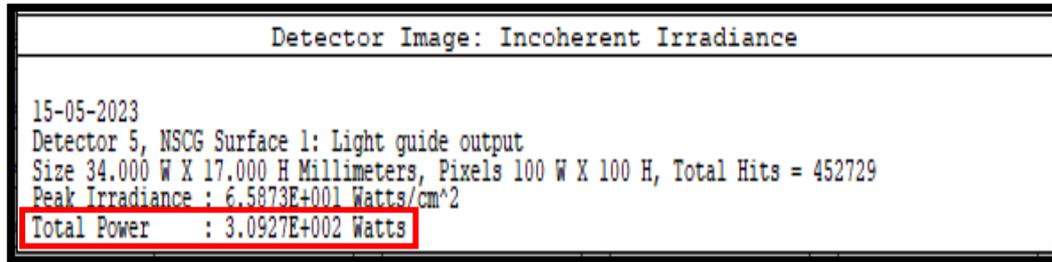
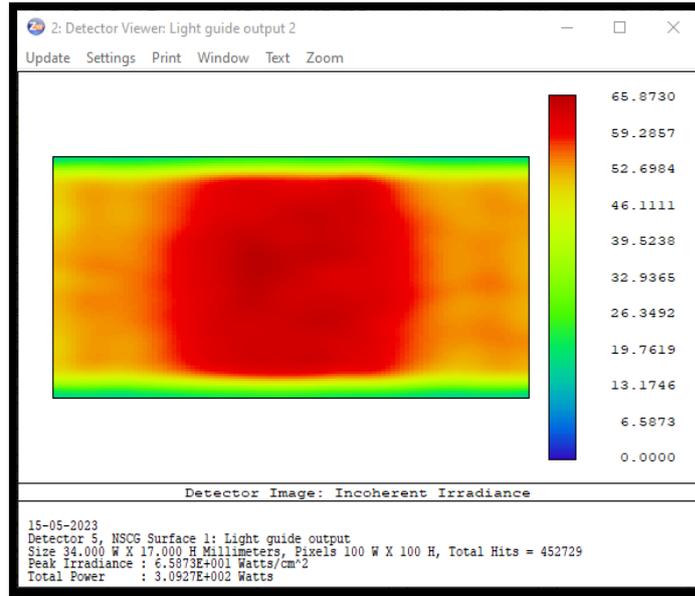
• قياس طاقة الضخ (عند البؤرة ومخرج الدليل الموجي):

تم قياس الاستطاعة المركزة في البؤرة المتصلة بمدخل الدليل الموجي بواسطة كاشف سطحي أول قدرها 315.38w كما يوضح الشكل (24-3).



الشكل(24-3): رسم تخطيطي يوضح الاستطاعة الضوئية في البؤرة.

بعد مرور الإشعاعات عبر الدليل الموجي قمنا بقياس الاستطاعة عند نهايته، بواسطة كاشف سطحي ثاني قدرت بـ: 309.27w كما يوضح الشكل(25-3).



الشكل (3-25): رسم تخطيطي يوضح الاستطاعة الضوئية عند مخرج الدليل الموجي.

• حساب الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال (Cr: Nd: YAG):

هناك طريقتان لحساب قيمة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG) هما:

أ- الطريقة الأولى:

نقوم بإضافة جميع المعلومات الخاصة بالمادة المضافة (Cr^{+3}) وذلك بإتباع الخطوات التالية:

نضغط على أيقونة Gla الموجودة في واجهة برنامج ZEMAX تظهر قائمة كما هي موضحة في الشكل (3-26) ونقوم بإدخال اسم المادة المضيئة (Cr^{+3}) وجميع المعلومات الموجودة في هذه النافذة.

الشكل (3-26): واجهة لإدخال اسم ومختلف معلومات المادة المضافة.

بعد ذلك نضغط على Transmission الموجودة في النافذة الموضحة في الشكل (3-26) تظهر نافذة جديدة مبنية في الشكل (3-27) بها جدول يحتوي على الأطوال الموجية والنفذية والسك الخاص بالمادة المطعمة الثانية (المضافة) وبعد الانتهاء نقوم بالحفظ ونحسب.

Number	Wavelength:	Transmission:	Thickness:
1	0.000000	1.000000	1.000000
2	0.000000	1.000000	1.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000

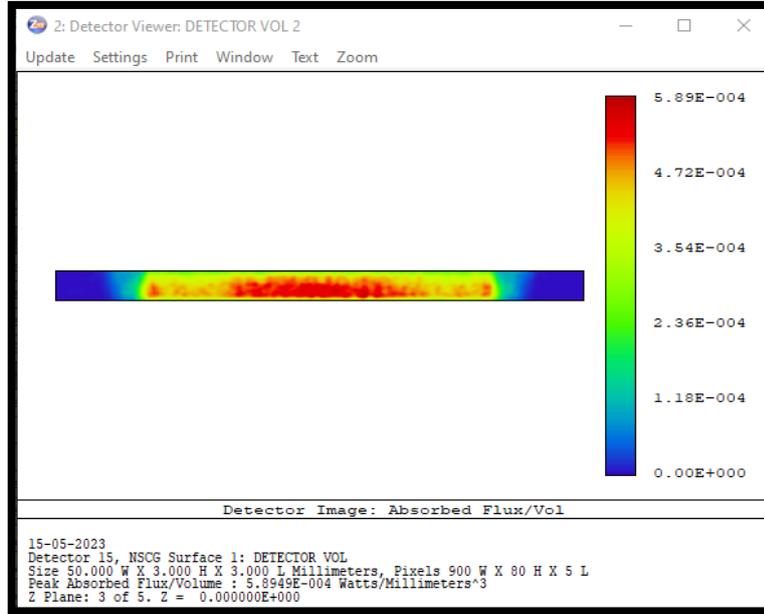
الشكل (3-27): نافذة لتحديد نفذية وسك المادة المضافة بدلالة الأطوال الموجية.

ب- الطريقة الثانية:

نقوم بحساب قيمة مصدر الطاقة انطلاقاً من نسبة التطابق الجديدة 24% (بين طيف امتصاص Nd: YAG Cr مع طيف انبعاث الشمس) وبعد ذلك نضعها في قائمة المصادر الموجودة في واجهة برنامج ZEMAX.

❖ نضراً لصعوبة الطريقة الأولى نلجئ للحساب بالطريقة الثانية.

يمكننا برنامج ZEMAX من قياس استطاعة طاقة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعال (Nd: Cr: YAG) ومعرفة طريقة توزيعها، وذلك من خلال الكاشف الحجمي (نقاط حجمية والتي تسمى الفوكسل)، فنحصل على النتيجة الموضحة في الشكل التالي (28-3):



الشكل (28-3): رسم تخطيطي لكاشف ضوئي على طول الوسط (Cr: Nd: YAG) ببرنامج ZEMAX. من خلال الرسم لا يمكن معرفة قيمة الاشعة الممتصة، حتى نتمكن من قياس الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال (Cr: Nd: YAG) نحول الصورة المعطاة في الشكل (28-3) وذلك بالضغط على (Text) ليتم تخزينه كنص رقمي ثم يفتح بواسطة "Excel" لتجمع الاستطاعة الممتصة في كل نقاط الوسط كما في الشكل (29-3).

Absorbed Flux	Absorbed Flux	Incident	Center Z	Center Y	Center X	Voxel
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2
			0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3
			7.14E-06	8.93E-09	2.86E-02	415
			5.31E-06	6.64E-09	3.64E-02	416
			0.00E+00	0.00E+00	1.20E+00	359999
			0.00E+00	0.00E+00	1.20E+00	360000
			7.56E+01			

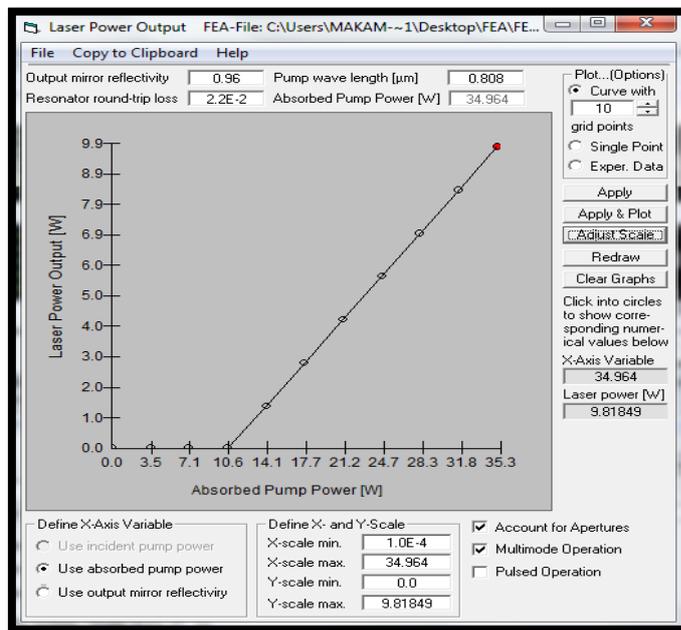
الشكل (29-3): نتيجة الاستطاعة الممتصة الكلية للوسط الفعال (Cr: Nd: YAG) باستخدام برنامج Excel.

❖ نلاحظ أن قيمة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG) أكبر من قيمة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Nd: YAG). وهذا راجع إلى أن أيونات Cr^{+3} تساهم في زيادة نسبة الامتصاص من طيف انبعاث الشمس. من خلال هذه النتائج التي توصلنا إليها نقوم بمحاكاتها باستعمال برنامج "LASCAD" للحصول على استطاعة ليزر شمسي.

3-6-2 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD:

3-6-2-1 حساب طاقة خرج الليزر للوسط (Nd: YAG):

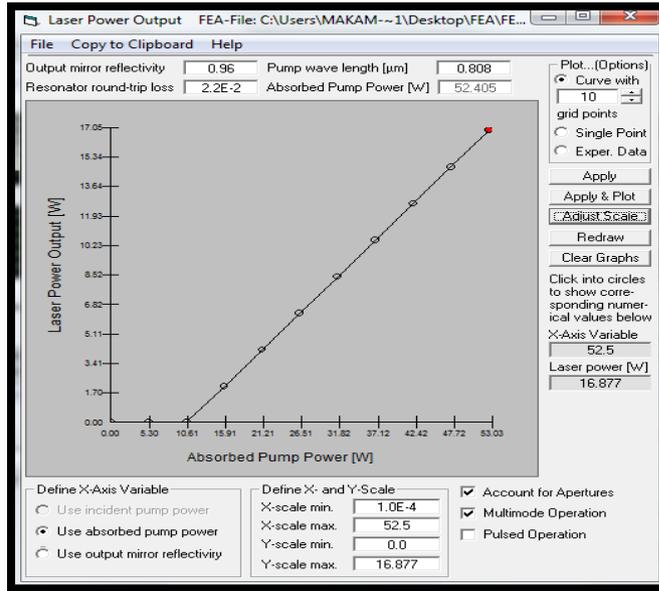
تتم معالجة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Nd: YAG) الناتجة عن تحليل برنامج ZEMAX بواسطة برنامج LASCAD للعثور على استطاعة الليزر. يكون منحى انبعاث الليزر كدالة للطاقة الممتصة أو انعكاسية المرآتين. نلاحظ أن بداية توليد الليزر (طاقة العتبة) كان عند القيمة (10.61w)، وهذا التأخر راجع إلى تغطية مجمل الضياعات داخل المرنان، بعد هذه القيمة نلاحظ أنه كلما زادت الطاقة الممتصة زادت استطاعة الليزر حيث بلغت قيمتها (9.82w).



الشكل (3-30): طاقة خرج الليزر من طرف لوسط (Nd: YAG).

3-6-2-2 حساب طاقة خرج الليزر للوسط (Cr: Nd: YAG):

تتم معالجة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG) الناتجة من تحليل ZEMAX بواسطة برنامج LASCAD للحصول على كفاءة ليزر، قدرت قيمة طاقة خرج الليزر المحسوسة عددياً كدالة لطاقة الضخ الممتصة بـ: (16.88w).



الشكل(3-31): طاقة خرج الليزر من طرف الوسط (Cr: Nd: YAG).

7-3 مناقشة النتائج:

بعد محاكاة منظومة الليزر الشمسي المقترحة في هذه الدراسة تم الحصول على استطاعة ممتصة من طرف الوسط الفعال (Nd: YAG) قدرها 50.1w انطلاقا من استطاعة المنبع المساوية لـ: (255w)، إذا يمثل هذا الفرق بين الاستطاعتين (الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط واستطاعة المنبع) مجمل الضياعات في مكونات المنظومة (المركز ذو القطع المكافئ والدليل الموجي والمركز الثانوي والتجويف البصري بالإضافة إلى النسبة التي يمتصها حوض التبريد (الماء)) ونسبة التطابق بين طيف امتصاص الوسط (Nd: YAG) وطيف انبعاث الشمس (16%) [3]. بلغت الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط المنبع الأول والمنبع الثاني الزيادة في نسبة تطابق طيف امتصاص الوسط (Cr: Nd: YAG) مع طيف انبعاث الشمس (24%) [4]. من خلال قيم الاستطاعة الممتصة من طرف كل وسط تحصلنا على استطاعة ليزر الوسط (Cr: Nd: YAG) قدرها 16.88W، وهي استطاعة عالية نسبيا مقارنة باستطاعة ليزر (Nd: YAG) التي قدرت بـ: (9.82 W)، والسبب في زيادة استطاعة ليزر الوسط (Cr: Nd: YAG) هي تحويل الطاقة الممتصة من طرف أيونات Cr^{+3} إلى أيونات Nd^{+3} التي تتم عبر الانتقال الغير إشعاعي من (2E) لأيون Cr^{+3} إلى المستوي الطاقوي العلوي ($^4F_{3/2}$) لأيون Nd^{+3} وهذا ما أدى إلى زيادة استطاعة الليزر.

8-3 الخلاصة:

تم التطرق في هذا الفصل إلى محاكاة العديد من الأعمال السابقة حول منظومة الليزر الشمسي بواسطة البرامج "ZEMAX" و"LASCAD" عن طريق الضخ الجانبي، وذلك بإعطاء قيم خواص الليزر الخاصة بكل وسط: الوسط (Nd: YAG) والوسط (Cr: Nd: YAG) على التوالي، ومن ثم المقارنة بينهما. فتوصلنا إلى أن الوسط (Cr: Nd: YAG) يملك طاقة ليزر عالية قدرت بـ: 16.88w. أكبر من طاقة ليزر الوسط

(Nd: YAG) التي قدرت بـ: (9.82w) وهذا بمساهمة أيونات الكروم Cr^{+3} في تحسين امتصاص أيونات Nd^{+3} بواسطة الانتقالات بين 2E إلى $^4F_{3/2}$.

قائمة مراجع الفصل الثالث:

- [1] نور الدين حمروني، " ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين "، أطروحة دكتوراه، جامعة الوادي (2021).
- [2] مريم أزهر علي غالب، " تقييم كفاءة خلية شمسية من مادة السيليكون ذات احاديد مختلفة الشكل باستخدام برنامج "ZEMAX"، رسالة مقدمة لنيل درجة ماجستير علوم فيزياء، جامعة بغداد(2016).
- [3] B. Tibúrcio, "Solar-Pumped laser technology " Dissertação para optenao Grau de Doutorado, Universidade nova de Lisboa, Marco, 2022.
- [4] D. Liang, C.R. Vistas, B.D. Tibúrcio, J. Ahmeida, " Solar-pumped Cr: Nd: YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency ", Solar Energy Materials and Solar Cells 185, 75–79, (2018).

الجامعة العامة

الخاتمة العامة:

الليزر الشمسي هو تحويل أشعة الشمس إلى ليزر، وذلك من خلال تركيز هذه الأشعة وتوجيهها نحو الوسط الفعال. للحصول على استطاعة ليزر شمسي أستعمل الوسط (Nd: YAG) لكونه أفضل المواد الليزرية المحفزة بالشمس، نظرا لخصائصه الفيزيائية والحرارية إلا أن العيب البارز لهذا الوسط هو أن تطابق نسبة طيف امتصاصه مع طيف انبعاث الشمس قدرت بـ: 16% وهي نسبة صغيرة نسبيا.

تم العمل في هذه الدراسة على تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي (Nd: YAG) بواسطة إضافة أيونات (Cr^{+3}) قصد الحصول على كفاءة ليزر أعلى. ومن خلال هذا توصلنا إلى أن استطاعة الليزر المنتج تحدد انطلاقا من الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال.

بعد عملية المحاكاة العددية بواسطة برنامج "ZEMAX" تم الحصول على قيمة الطاقة الممتصة من طرف الوسط Nd: YAG قدرها: (50.1 w)، وقيمة الطاقة الممتصة من طرف الوسط Cr: Nd: YAG قدرت بـ: (75.6 w)، انطلاقا من هذه القيم أستعمل برنامج LASCAD فتحصلنا على استطاعة ليزر الوسط Nd: YAG قدرها (9.82w)، واستطاعة ليزر الوسط Cr: Nd: YAG قدرها (16.88w). وفي الأخير يمكن القول إن الوسط Cr: Nd: YAG يملك كفاءة ليزرية عالية مقارنة بكفاءة ليزر الوسط Nd: YAG.

إن السعي وراء تحسين منظومة الليزر الشمسي قصد الحصول على أكبر استطاعة ممكنة للأشعة الليزرية، لا تقتصر فقط على تحسين كفاءة العناصر المكونة لمنظومة الليزر الشمسي مثل (المركز الأولى والمركز الثانوي والدليل الموجي إلخ) بل تتعدى إلى تحسين كفاءة الوسط الفعال، وكنظرة مستقبلية في هذا الموضوع محاولة إيجاد أيونات أخرى تنتج نسبة تطابق أعلى.

المخلص:

تحول أشعة الشمس المركزة إلى ليزر وذلك من خلال توجيهها نحو الوسط الفعال، حيث تحدد الاستطاعة الممتصة من طرفه.

يعتبر الوسط الفعال (Nd: YAG) الأكثر شيوعا نظرا لخواصه الفيزيائية والحرارية الممتازة وبالرغم من ذلك فإن نسبة التطابق بين طيف امتصاصه وطيف انبعاث الشمس تبلغ 16% وهي نسبة ضعيفة نسبيا.

قصد تحسين كفاءة التحويل (ضوء الشمس إلى ضوء ليزر) قمنا في هذا العمل بدراسة تأثير إضافة أيونات Cr^{+3} إلى الوسط الفعال (Nd: YAG) من أجل الحصول على كفاءة ليزر أعلى. باستعمال البرامج "ZEMAX" و "LASCAD" توصلنا إلى أن الوسط (Cr: Nd: YAG) يملك كفاءة ليزرية عالية قدرت بـ: (16.88w)، أكبر من كفاءة ليزر الوسط (Nd: YAG) التي قدرت بـ: (9.82w) وبنسبة 1.72 % (بالنسبة لمنظومة الليزر الشمسي المقترحة في هذه المذكرة).

الكلمات المفتاحية: أشعة الشمس، الليزر الشمسي، كفاءة الليزر، الوسط الفعال (Nd: YAG)، التطعيم المضاعف، الوسط الفعال (Cr: Nd: YAG).

Résumé

La lumière solaire concentrée est convertie en laser en l'appliquant à un milieu actif qui détermine la puissance absorbée.

Le milieu actif (Nd : YAG) est le plus répandu en raison de ses excellentes propriétés physiques et thermiques et mécanique etc... Malgré cela, le chevauchement entre son spectre d'absorption et le spectre d'émission du soleil est de 16 %, ce taux est relativement faible.

Afin d'améliorer l'efficacité de conversion (lumière du soleil / lumière laser), dans ce travail, nous avons étudié l'effet du Co-dopage avec les ions Cr^{+3} du milieu actif (Nd : YAG) afin d'obtenir une efficacité laser plus élevée. Les programmes de simulation « ZEMAX et LASCAD », nous ont permis d'obtenir une puissance laser, pour le milieu Nd : YAG : 9.82w et pour le milieu Cr : Nd : YAG : 16.88w, cette dernière est supérieure de 1.72 fois que la première puissance (pour le système laser solaire proposé dans ce mémoire).

Mots clés : lumière solaire, laser solaire, rendement laser, milieu actif (Nd : YAG), Co-dopage, milieu actif (Cr : Nd : YAG).

