الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

رقم الترتيب: .....

رقم التسلسل: .....

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم: الفيزياء

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

تخصص: فيزياء إشعاع وطاقة

من إعداد الطلبة:

دو محمد ضياء الدين – قيطوبي عثمان – تومي بالقاسم

الموضوع

دراسة الأداء لليزر المضخ بواسطة الإشعاع الشمسي YAG lasers :Ce/Cr/Nd Study of the performance of the solar pumped Ce/Cr/Nd : YAG lasers

نوقشت يوم: 2024/06/23

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

- زروال صورية	أستاذ تعليم عالي	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	رئيسًا
- تيوة بلخير	أستاذ تعليم عالي	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	مناقشًا
- محلو السعيد	أستاذ محاضر - أ -	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	مؤطرًا

الموسم الجامعي 2024/2023

أنجز هذا العمل في مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES)

بسم الله الرحمن الرحيم

الإهداء

إلى كل من أضاء بعلمه عقل غيره

أو هدى بالجوا ب الصحيح حيرة سائليه

فأظهر بسماحته تواضع العلماء وبرحابته سماحة العارفين

وأهدي هذا العمل المتواضع إلى أبي الذي لم يبخل عليّ يوما بشيء

وإلى أمي التي زودتني بالحنان والمحبة

أقول لهم : أنتم وهبتموني الحياة والأمل والنشأة على شغف الاطلاع والمعرفة

وإلي إخوتي وأسرتي وجميع أحبتي.

دو محمد ضياء الدين

الإهداء

الحمد لله الذي أعاننا على إتمام هذا العمل أولا وآخرا وصلى الله على نبينا محمد وعلى آله وصحبه وسلم

أهدي هذا العمل إلى من كانت شمعة أضاءت لي حياتي إلى من كانت سندا و نبراسا و نور دربي إلى من ربتني على حب الخير و التقدم

وأهدي هذا العمل إلى أبي الحنون الذي كان مصدر قوتي و إلهامي

و إلى أخي سندي و قدوتي العيد و أخواتي و أبنائهم خاصة أختي الصغيرة

إلى كل من علمني حرفا أساتذتي

شكرا لكم على جهودكم

و إلى أصدقائي الأعزاء خاصة بالقاسم بن عمارة و علي تومي

إلى كل من نسيهم قلمي ولم ينساهم قلبي شكرا لكم جميعا

تومي بالقاسم

الإهداء

أحمد الله عز وجل على منّه و عونه لإتمام هذا البحث

و أصلي وأسلم على خير الأنام نبينا محمد ﷺ

أهدي هذا العمل إلى :

الوالدين العزيزين

زوجة أبي الفاضلة

الزوجة الكريمة

بناتي الغاليات المؤنسات :

حنين – نورسين – صفوة – رجوة

إلى الإخوة والأخوات الأعزاء وأبنائهم وكل الأقارب

وكل أصدقائي وعلى رأسهم قنوعة عز الدين الذي كان لي سندا في هذا المشوار.

قيطوبي عثمان

شكر وتقدير

الحمد لله حمدا كثيرا حتى يبلغ الحمد منتهاه، والصلاة والسلام على أشرف مخلوق أناره الله بنوره واصطفاه .

وانطلاقا من باب من لم يشكر الناس لم يشكر الله، نتقدم بخالص الشكر والتقدير للأستاذ المشرف **محلو السعيد** على إرشاداته وتوجيهاته التي لم يبخل بها علينا يوما، كما نتقدم بجزيل الشكر والعطاء إلى كل يد رافقتنا في هذا العمل سواء من قريب أو من بعيد، والشكر موصول أيضا إلى كل أعضاء لجنة المناقشة الأساتذة المحترمين السادة :

زروال صورية – محلو السعيد – تيوة بلخير.

كما لا ننسى أن نشكر أعضاء مخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية **LEVRES** وعلى رأسهم مدير المخبر **رحومه فرحات** ومهندس المخبر **قدة عثمان**، وجميع الأساتذة الذين أشرفوا علينا طوال مشوارنا الدراسي.

دو – تومي - قيطوبي

فهرس المحتويات

الإهداء..... I
شكر وتقدير IV
فهرس المحتويات V
فهرس الأشكال..... X
فهرس الجداول..... XIII
فهرس الرموز XIV
المقدمة العامة 1
قائمة مراجع المقدمة العامة..... 3

الفصل الأول: عموميات حول الليزر وتطبيقاته

I-1- تمهيد..... 5
I-2- نبذة تاريخية 5
I-3- تعريف الليزر 5
I-4- مكونات جهاز الليزر 6
I-4-1- الوسط الفعال 6
I-4-2- الضخ 6
I-4-3- المرنان 6
I-5- أنواع الليزر 7
I-5-1-ليزر الحالة السائلة..... 7
I-5-2-ليزر الحالة الغازية..... 7
I-5-3- ليزر أشباه الموصلات 7
I-5-4- ليزر الحالة الصلبة 7
I-5-4-1-أنواع ليزر الحالات الصلبة 8
I-6-خصائص شعاع الليزر 8
I-6-1-أحادية الطول الموجي 8
I-6-2-الترابط..... 8

I-6-3-الاتجاهية 9
I-6-4-السطوع 9
I-7- تفاعل مادة إشعاع 10
I-7-1-إحصاء بولتزمان Boltzman 10
I-7-2-الامتصاص 11
I-7-3-الانبعاث التلقائي 12
I-7-4-الانبعاث المحفز 13
I-7-4-1-شروط الانبعاث الليزري 14
I-7-4-1-1-الانبعاث المحفز 14
I-7-4-1-2-التكبير الضوئي 14
I-7-4-1-3-الانقلاب السكاني 14
I-8- أنواع الأنظمة الليزرية 14
I-8-1- نظام ثلاثي السويات 14
I-8-2- نظام رباعي السويات 15
I-8-3- مقارنة بين النظام ثلاثي المستوي ورباعي المستوي في المنظومة الليزرية 15
I -9- تطبيقات الليزر 16
I-10- خلاصة 17
قائمة مراجع الفصل الأول 18

الفصل الثاني : الليزر الشمسي وليزرات الحالة الصلبة

II-1- تمهيد 20
II-2- الإشعاع الشمسي 20
II-3- طيف الإشعاع الشمسي 20
II-4- تعريف الليزر الشمسي 21
II-5- مكونات تقنية الليزر الشمسي 22
II-5-1- منظومة التركيز الأولية 25
II-5-2- منظومة التركيز الثانوية 25

II-5-3- منظومة التتبع الشمسية 25
II-5-4- منظومة التبريد 25
II-5-5- الوسط الليزري الفعال 25
II-5-6- التجويف الرنيني (المرنان)..... 26
II-6- الضخ 26
II-6-1- أنواع الضخ 26
II-6-1-1- الضخ غير المباشر 26
II-6-1-2- الضخ المباشر 26
II-6-2 - آليات الضخ 26
II-6-2-1 - الضخ الجانبي 26
II-6-2-2- الضخ على الطرف 27
II-7- ليزرات الحالة الصلبة 27
II-7-1- خصائص المواد الصلبة..... 27
II-7-2- أيونات الأتربة النادرة 27
II-7-3- التوزيع الالكتروني للأتربة النادرة و أيوناتها 28
II-7-4 - خصائص المواد المضيفة لعناصر الاتربة النادرة..... 29
II-7-5- المادة المضيفة:عقيق الألمنيوم الإيتريوم (YAG)..... 30
II-7-6- النيوديميوم Nd 30
II-7-6-1- عقيق الألمنيوم الإيتريوم (YAG) المطعم بواسطة النيديوم (Nd:YAG) .. 31
II-7-6-2 - ليزر عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بواسطة ذرات النيوديميوم (Nd:YAG) 32
II-7-6-3- طيف امتصاص (Nd:YAG) ونسب التطابق مع طيف الانبعاث الشمسي . 34
II-7-6-4 - مكونات وتركيبة ليزر: Nd :YAG 35
II-7-7- التطعيم المضاعف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم بكل من النيوديميوم والكروم (Cr:Nd:YAG) 36

II- 7- 8- عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم والكروم (Cr:Nd:YAG) 36

II- 7- 9- التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي و طيف امتصاص (Cr:Nd:YAG) 37

II-7-10- آلية نقل الطاقة الممتصة من ذرات الكروم Cr^{+3} إلى ذرات النيوديميوم Nd^{+3}..... 38

II-7-11- التطعيم المضاعف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم بكل من النيوديميوم و السيريوم (Ce:Nd:YAG) 39

II-7-12- عقيق الألمنيوم و الايتريوم ذو التطعيم المضاعف بـ Nd^{+3} و Ce^{+3} 39

II-7-13- خصائص بلورة (Ce:Nd:YAG)..... 40

II-7-14-التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي و طيف امتصاص (Ce:Nd:YAG)..... 41

II-7-15- نقل الطاقة الممتصة من أيونات الكروم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديميوم Nd^{+3}..... 42

II-8- دراسة عامة للوسط الفعال(Ce Cr Nd YAG)، عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بكل من أيونات النيوديميوم والسيريوم و الكروم 44

II-8-1- التطعيم المضاعف للوسط (Nd:YAG) بكل من أيونات والسيريوم والكروم 44

II-8-2- عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بكل من أيونات النيوديميوم والسيريوم والكروم

(Ce:Cr:Nd:YAG)..... 45

II-8-3- التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص للوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG)..... 47

II-8-4- الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG) 47

II-8-5- آليات نقل الطاقة داخل الوسط الفعال (CeCrNdYAG)..... 48

II-9- خلاصة 48

قائمة مراجع الفصل الثاني..... 49

الفصل الثالث: العمل التجريبي والنتائج

III-1- تمهيد 51

III-2-المحاكاة العددية 51

III-2-1- برنامج Zemax لتصميم منظومة الليزر الشمسي..... 51

III-2-2- برنامج LASCAD لمحاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي 53

III-2-2-1- تحليل العناصر المتناهية (FEA) للتأثيرات الحرارية..... 54

III-3- طريقة انتشارشعاع الليزر(BPM) 56
III-4- منظومة الليزرالشّمسي 56
III-4-1- منظومة التركيزالأولية (عدسة فرنييل) 57
III-4-2-الدليل الموجي 58
III-4-3-التجويف البصري 58
III-4-4-الوسط الفعال 59
III-4-5-التجويف الرنيني 59
III-4-6-حوض التبريد 59
III-5- نتائج المحاكاة العددية 60
III-6- نتائج المحاكاة العددية بواسطة برنامج LASCAD 71
III-7- خلاصة 79
قائمة مراجع الفصل الثالث 80
الخاتمة العامة 82

فهرس الأشكال

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
	الفصل الأول	
(1-I)	ضوء الليزر	5
(2-I)	مكونات جهاز الليزر	7
(3-I)	أ : ضوء ليزري ب : ضوء عادي	8
(4-I)	أ : ضوء ليزر مترابط ب : ضوء عادي غير مترابط	9
(5-I)	اتجاهية ضوء الليزر	9
(6-I)	مخطط آلية الامتصاص	11
(7-I)	مخطط آلية الانبعاث التلقائي	12
(8-I)	مخطط لآلية الانبعاث المحفز	13
(9-I)	مخطط ليزر ثلاثي السويات	15
(10-I)	مخطط ليزر رباعي السوية	15
	الفصل الثاني	
(1-II)	جدول يوضح طيف الاشعاع الشمسي	24
(2-II)	منظومة الليزر الشمسي	24
(3-II)	رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزرالشمسي	26
(4-II)	تخطيط لمبدأ الضخ على الطرف في الليزر الشمسي	27
(5-II)	موقع عناصر الأتربة النادرة في الجدول الدوري	28
(6-II)	عقيق الالمنيوم الايترنيوم (YAG ، $Y_3Al_5O_{12}$)	30
(7-II)	مخطط يوضح مستويات الطاقة والأنتقالات الكترونية	31
(8-II)	مخطط مستويات الطاقة لـ Nd:YAG	33
(9-II)	تداخل طيف امتصاص للوسط (Nd:YAG) مع طيف الانبعاث الشمسي	34
(10-II)	طيف الامتصاص والانبعاث لـ (Nd:YAG)	34
(11-II)	رسم تخطيطي لليزر Nd:YAG يعمل بالطاقة الشمسية	35
(12-II)	طيف الامتصاص للأوساط (Nd:YAG) (Cr:Nd:YAG) (Cr:YAG)	37

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
(13-II)	تطابق طيف انبعاث الاشعاع الشمسي مع طيف امتصاص (Cr:Nd:YAG)	37
(14-II)	مخطط نقل الطاقة من أيونات الكروم Cr^{+3} إلى أيونات النيوديومNd^{+3}	39
(15-II)	التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف امتصاص Ce:Nd:YAG	42
(16-II)	طيف الامتصاص لـ (Ce:Nd:YAG) ، طيف الامتصاص لـ (Nd:YAG)، طيف الفلورة لـ (Ce:YAG) ، طيف الانبعاث للاشعاع الشمسي	43
(17-II)	مخطط نقل الطاقة في الوسط الفعال Ce:Nd:YAG	43
(18-II)	طيف النفادية للسيراميك الشفاف Ce:Cr: Nd:YAG بسمك 1 mm	46
(19-II)	مستويات الطاقة وآلية نقل الطاقة بين أيونات النيوديوم والكروم والسيريوم تحت ضخ قدره 407nm	47
(20-II)	طيف الانبعاث للوسطين (Nd:YAG) و(Ce:Cr:Nd:YAG) بواسطة ضخ خارجي قيمته 407nm	48
(21-II)	مخطط نقل الطاقة داخل الوسط (Ce:Cr:Nd:YAG).	49
	الفصل الثالث	
(1-III)	نافذة برنامج Zemaxمفتوحة	52
(2-III)	صورة للبرنامج	54
(3-III)	**أ:** نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامجLASCAD. **ب:** تحديد مصدرالاستطاعة الممتصة من الوسط الفعال من خلال ملفات برنامج Zemax ®.	55
(4-III)	**أ:** متغيرات تحديد درجة حرارة الغرفة **ب:** متغيرات مادة الوسط الفعال(YAG:Nd)	55
(5-III)	مّنظومة الليزرالشّمسيّ	57
(6-III)	العدسة (القطر 60 مم ، الارتفاع 18 مم)	57
(7-III)	الدليل الموجي(القطر العلوي 60 مم ،القطر السفلي 12مم الارتفاع 58مم)	58
(8-III)	التجويف البصري (القطر العلوي 13 مم ، القطر السفلي 4.5 مم الارتفاع 21مم)	58
(9-III)	الوسط الفعال (القطر 3 مم ، الطول25 مم) Nd:YAG.	59
(10-III)	التجويف الرنيني	59

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
(11-III)	حوض التبريد (القطر 14 مم ، الارتفاع 24مم)	60
(12-III)	نسبة الطاقة الشمسية المركزة 81.15 w	61
(13-III)	قياس نسبة الاستطاعة عند مخرج الدليل الموجي	62
(14-III)	نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال – الكاشف الحجمي - الوسط Nd:YAG	63
(15-III)	شكل Excel	64
(16-III)	الأطوال الموجية الممتصة من قبل المادة الجديدة	64
(17-III)	نسبة الطاقة الشمسية المركزة 120.99 w	66
(18-III)	قياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعالCr:Nd: YaG	67
(19-III)	نسبة الطاقة الشمسية المركزة 161.45 w	69
(20-III)	قياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعالCe:Nd:YAG	69
(21-III)	نسبة الاستطاعة المركزة عند البؤرة 188.71w	70
(22-III)	استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعالCr:Ce:Nd YaG	71
(23-III)	1/طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعال Nd:YAGبواسطة برنامج LASCAD 2 / طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD	72
(24-III)	طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعال Cr:Nd:YAG بواسطة برنامج LASCAD	73
(25-III)	طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD	74
(26-III)	**1/**طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعال Ce:Nd:YAG بواسطة برنامج LASCAD **2/** طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD	75
(27-III)	**1/** طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعال Cr:Nd:YAG :Ce.بواسطة برنامج LASCAD **2/**طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD	76

فهرس الجداول

ترتيب الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
	الفصل الأول	
(1-I)	مقارنة بين النظام ثلاثي المستوي ورباعي المستوي في المنظومة الليزرية	16
	الفصل الثاني	
(1-II)	التوزيع الالكتروني لذرات الأتربة النادرة	29
(2-II)	نطاق الامتصاص والإصدار لبعض الأتربة النادرة وبعض الأوساط الليزرية	29
(3-II)	جدول الخصائص الحرارية لـ (Nd:YAG)	32
(4-II)	جدول الخصائص الفزيائية والبصرية لـ (Nd:YAG)	32
(5-II)	أهم الخصائص الفزيائية والكميائية والحرارية لـ (Ce:Nd:YAG)	41

فهرس الرموز

❖ الرموز

المقدار	الرمز	الوحدة
تردد الفوتون	υ	H_Z
طاقة الالكترون	E	eV
عدد الذرات في المستوي الأدنى	N_1	$Atom/m^3$
عدد الذرات في المستوي الأعلى	N_2	$Atom/m^3$
انحلال السوية E_1	g_1	$Atom/m^3$
انحلال السوية E_2	g_2	$Atom/m^3$
كثافة طاقة الإشعاع	$\rho(\upsilon)$	$m^3.s^{-2}.J^{-1}$
معامل اينشتاين للامتصاص	B_{12}	$J.s.m^{-3}$
احتمال الامتصاص لوحدة الزمن	W_{12}	s^{-1}
ثابت بلانك	h	J.s
ثابت بولتزمان	K	J/K
درجة الحرارة	T	K^O
معامل اينشتاين للانبعاث التلقائي	A_{21}	s^{-1}
زمن المكوث في السوية	τ_{21}	S
معامل اينشتاين للانبعاث المحفز	B_{21}	$m^3.s^{-2}.J^{-1}$
احتمال الانبعاث المحفز لوحدة الزمن	W_{21}	s^{-1}
طول الموجة	λ	M
قرينة انكسار الوسط الفعال	N	/
سرعة الضوء في الفراغ	C	m/s
كتلة الشمس	M_S	Kg
قطر الشمس	D_S	M

المقدار	الرمز	الوحدة
معامل انعكاسية المرآة	R	%
كفاءة الانحدار(الميل)	tanα	/

❖ المصطلحات:

المصطلح بالعربي	المصطلح بالإنجليزية
الضوء	Light
الليزر	Laser
الياقوت الأحمر	Ruby
إشعاع	Radiation
منظومة الليزر	Laser system
تضخيم الضوء	Light amplification
الانبعاث المحفز	Stimulated emission
فوتون	Photon
تردد	Frequency
طول موجي	Wavelength
الوسط الفعال	active medium
الانبعاث	Emission
الطاقة	Energy
الضخ	Pumping
نظام نبضي	Pulse system
نظام مستمر	Continuous system
أشباه الموصلات	Semiconductors

المصطلح بالعربي	المصطلح بالإنجليزية
المرنان	Resonator
الانعكاسية	Reflexivity
ليزر الحالة الصلبة	Solid state laser
الأيون	Ion
التطعيم	Dopping
البلورة	Crystal
النيوديميوم	Neodymium
الزجاج	Glass
عقيق الألمنيوم الإيتريوم	Yttrium aluminum garnet
الترابط	Coherence
السطوع	Brightness
إشعاع كهرومغناطيسي	Electromagnetic radiation
الامتصاص	Absorption
المستوي الأرضي	Ground level
المستوي العلوي	upper level
الانبعاث التلقائي	Spontaneous emission
التوازن الحراري	Thermal Equilibrium
زمن المكوث	Lifetime
الانقلاب السكاني	Population inversion
نظام ثلاثي السوية	three levels system
نظام رباعي السوية	four levels system
المادة المضيفة	Host material
طيف الاشعاع الشمسي	Solar radiation spectrum

المصطلح بالإنجليزية	المصطلح بالعربي
Solar laser	الليزر الشمسي
Primary concentrator system	منظومة التركيز الأولية
Secondary concentrator system	منظومة التركيز الثانوية
Solar tracking system	منظومة التتبع الشمسي
Cooling system	منظومة التبريد
Parabolic mirrors	المرايا القطع مكافئية
Fresnel lens	عدسة فرينيل
Laser rod	قضيب الليزر
Side- pumping	الضخ الجانبي
End - Pumping	الضخ عند الأطراف
Chromium	الكروم
Cerium	السيريوم
Florescence	الفلورة
Rare earths	الأتربة النادرة
Radiation emission	انبعاث مشع
Laser gain	كسب الليزر
Pumping threshold	عتبة الضخ
Laser efficiency	كفاءة الليزر
Visible light	الضوء المرئي
Radiation transmission	الانتقال الاشعاعي
Non-radiative transmission	الانتقال غير الاشعاعي
Flurenscece lifetime	عمر الفلورة
Infrared radiation	الأشعة تحت الحمراء

المصطلح بالعربي	المصطلح بالإنجليزية
الأشعة فوق البنفسجية	Ultraviolet radiation
الاسترخاء المتبادل	Cross- relaxation
التحويل التنازلي التعاوني	Collaborative downward transformation
التحويل التنازلي للقطع الكمي	Downward transformation of quantitative plots
سيراميك الليزر	Laser ceramics
المحاكاة	Simulation
الاستطاعة الممتصة	Absorbed power
حزمة الليزر	Laser beam
المصادر الضوئية	Light sources
الكاشف	The detector
الدليل الموجي	Waveguide
التجويف البصري	Optic cavity
البؤرة	Focus
الكاشف الحجمي	Volumetric detector
خراج الليزر	Laser abscess
كفاءة الانحدار	Slope efficiency
كفاءة التجميع	Regression efficiency
كفاءة التحويل الشمسي الليزري	Solar laser conversion efficiency
الاستطاعة المنبعثة	Emitted power
استطاعة المنبع	Source capacity

المقدمة العامة

مقدمة عامة

يعتبر مجال الطاقات المتجددة من أ برز الميادين الحديثة ذات الأهمية الاقتصادية الكبيرة وبديلا هاما ومناسب للطاقات الأحفورية الكلاسيكية القديمة كالبترول والغاز والتي يستنفذ مخزونها في العالم يوما بعد يوم، إضافة إلى أضرارها العالية تجاه النظام البيئي .

تعتبر الطاقة الشمسية من أبرز مصادر الطاقات المتجددة وغير النفوذة والتي استغلها الإنسان منذ القدم في نشاطه اليومي فهي أصل مصادر الطاقة المختلفة الموجودة في الطبيعية وتتميز بكونها طاقة نظيفة دائمة و اقتصادية، حيث تم استغلالها باستخدام عدة طرق وتجهيزات مثل الالواح الشمسية والخلايا الكهروضوئية التي تلتقط ضوء الشمس الساقط وتحوله إلى تيار كهربائي مباشر، تم مؤخرا استغلال هذه الطاقة أيضا في توليد أشعة الليزر أو ما يسمي بالليزر الشمسي(Solar pumped- laser) SPL حيث يتم تحويل الأشعاع الشمسي واسع النطاق وغير المترابط إلى إشعاع ليزري متماسك وعالي السطوع ذى استخدامات مفيدة وواسعة.

أُكتشف في عام 1917م مبدأ الليزر من طرف العالم ألبرت أينشتاين عندما أثبت إمكانية الانبعاث المحفز، مما فتح الباب لإيجاد نوع جديد من الإشعاعات المنبعثة [1].

توالت الأبحاث حتى عام 1963 حيث أعلن عن أول ليزرشمسي من طرف العالم يونغ وزملائه باستعمال عقيق الايتريوم والألمنيوم المطعم بالنيوديميوم(Nd:YAG)، والذي أبرز خصائص فزيائية وحرارية ممتازة، حيث يتميز بموصلية حرارية جيدة وصلابة عالية مكنته من مقاومة التلف الناتج عن الضخ المركز للإشعاع الشمسي داخله [2].

تم بعدها تحسين عمل المنظومة الليزرية عبر عدة مراحل من خلال تحسين عمل نظام المركزات الضوئية و تغير الأوساط الفعالة المستخدمة ذات نطاقات الامتصاص الأكبر والأعرض لطيف الاشعاع الشمسي والتي يتم الحصول عليها بمختلف عمليات التطعيم، حيث تم استخدام عدة أوساط ليزرية فعالة من أبرزها :

تم القيام بعملية التطعيم المضاعف للوسط الفعال (Nd:YAG) بواسطة أيونات الكروم Cr^{+3} وذلك من أجل الاستغلال الأمثل لطيف الاشعاع الشمسي وتعريض طيف الامتصاص حيث تم :

سنة 2007م تم تحقيق الليزر المضخ بالطاقة الشمسية مع قضيب سيراميك (Cr:Nd:YAG) من طرف Yabe وآخرين[3].

عام 2017 م تم تطبيق عدة محاولات لتحسين كفاءة الليزر الشمسي باستخدام الوسط الفعال (Cr:Nd:YAG) وجد أن له نطاق امتصاص واسع في المجال المرئي عند440 nmإلى 600 nm [4].

كما تم القيام بعملية التطعيم المضاعف للوسط الفعال (Nd:YAG) بواسطة أيونات السيريوم Ce^{3+} حيث منذ 1969 تم بذل جهود متواصلة في التطعيم المضاعف لبلورة (Nd:YAG) بعنصر أيونات السيريوم الثلاثيCe^{+3} حيث درس "Mares" و زملاؤه آلية نقل الطاقة بين Nd^{+3} و Ce^{+3} عند درجة حرارة منخفضة[5].

سنة 2015 قام "Tai" وزملاؤه بنشر آلية تعتمد على نقل الطاقة بين أيونات السيريوم Ce^{+3} وأيونات النيوديوم Nd^{+3} في بلورة (YAG) المطعمة (Ce:Nd:YAG) حيث أشارت النتائج إلى تعزيز الانبعاثات الليزرية بدرجة عالية وهذا راجع لأن أيون Ce^{+3} يملك نطاق امتصاص واسعا في المناطق المرئية وفوق البنفسجية[5].

سنة 2018 أنجز Poyziyew ومجموعته عملية محاكاة على الليزر ذي الوسط (Ce:Nd:YAG) فأثبت هذا النموذج كفاءة الميل وقوة الليزر المنبعث .

توالت التجارب حتى سنة 2022 حيث اقترح Liang وزملاؤه طريقة الطاقة الشمسية المتزامنة الأكثر كفاءة لنظام يتكون من ثلاث قضبان من (Ce:Nd:YAG) داخل تجويف ضخ أحادي [6]

يعتبر الوسط الليزري الفعال (Nd:YAG) وسط جيد لتوليد الفعل الليزري حيث يتميز بعدة خصائص فزيائية وحرارية جيدة، رغم كل هذا يبرز هذا الوسط نطاق تداخل وتطابق ضعيف وضيق لطيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي، حيث يمتص ما قيمته 16% من مجموع طيف الانبعاث الشمسي (84% من الطاقة لا تستغل [7] ، وبالتالي نحصل علي استطاعة ليزرية منخفظة نسبيا، لرفع كفاءة الاشعاع الليزري النتاتج، نعمل على تحسين نسبة التطابق بين طيف الاشعاع الشمسي المنبعث وطيف امتصاص الوسط الليزري (تعريض نسبة التداخل) ويتم ذلك عبر عملية التطعيم المضاعف للوسط (Nd:YAG) بعناصر الكروم والسيريوم وذلك لإمكانية نقل الطاقة بين هذه الأيونات وبالتالي الحصول على منظومة ليزرية أكثر كفاءة، حيث نستعمل البرنامجين ZEMAX و LASCAD للنمذجة والمحاكات العددية.

تم في هذا العمل دراسة الأداء لليزر المضخ بواسطة الاشعاع الشمسي للوسط الفعال ذي المادة المضيفة الصلبة YAG (عقيق الالمنيوم والايتريوم) المطعمة بالعناصر التالية : النيوديميوم ، الكروم ، السيريوم

تنقسم هذه المذكرة إلى ثلاثة فصول هي :

- **الفصل الأول:** تم فيه دراسة نظرية عامة حول الاشعاع الليزري، حيث تم التعريف عليه مع ذكر خصائصه وأنواعه وطرق توليده وأهم مكونات جهازه وكذا تطبيقاته ومجالات استعماله .
- **الفصل الثاني:** تم فيه دراسة الليزر الشمسي وبعض ليزرات الحالة الصلبة ، حيث قدمنا لمحة عن الأشعة الشمسية وبعض خصائصها ثم قدمنا دراسة حول الأوساط الليزرية الصلبة المستخدمة (Nd:YAG) ، (Cr:Nd:YAG) ، (Ce:Nd:YAG) ، (Ce: Cr:Nd:YAG). وخصائصها وكيفية الحصول عليها .

الفصل الثالث: تم فيه القيام بعملية المحاكاة العددية للمنظومة الليزرية باستخدام برنامج ZEMAX بهدف الحصول على الاستطاعة الضوئية الممتصة للأوساط الليزرية التالية :
(Nd:YAG) ، (Cr:Nd:YAG) ، (Ce:Nd:YAG) ، (Ce: Cr:Nd:YAG)

في كل حالة بعدها يتم استخدام برنامج LASCAD بهدف الحصول على استطاعة الليزر الشمسي الناتج في كل وسط، ثم مناقشة النتائج المتحصل عليها .

في الأخير، ترفق المذكرة بخاتمة عامة حول أهم النتائج المحققة .

قائمة مراجع المقدمة العامة

❖ المراجع الأجنبية

[1] 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.

[2] C. G. Young, “A Sun-Pumped cw One-Watt Laser,” Appl. Opt., vol. 5, no. 6, pp. 993–997 (1966).

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

[5] Sonam Berwal,Neha Khari,Daewook kim,"A review on design modalities of solar – pumped solid – state laser" Applied Surfface Science Advances, 12(2022)100348

[6] Sonam Berwal,Neha Khari,Daewook kim,"A review on design modalities of solar – pumped solid – state laser" Applied Surfface Science Advances, 12(2022)100348

[7]Dawei Liang.Joana Almeida.Claudia.Vistas.Bruno Tubircio.Dario Garcia"Solar-Pumped Lasers with examples of numerical Analysis of solid –state Lasers"pp81-166(2023).

❖ المراجع العربية

[3] نور الدين حمروني، "ضخ الليزر الشمسي من كال الطرفين"، أطروحة دكتوراه، جامعة الوادي (2020).

الفصل الأول

عموميات حول الليزر وتطبيقاته

I-1- تمهيد:

يعتبر الضوء جزءا أساسيا من حياتنا اليومية وعاملا حاسما في استمرار الحياة البشرية كما يلعب دورا هاما في استقرار النظام البيئي، وتأتي مصادر الضوء بأشكال متنوعة بدءا من ضوء الشمس كمصدر أساسي للضوء الطبيعي وصولا إلى المصادر الصناعية كالمصابيح الكهربائية المتنوعة، وفي الوقت الحالي تتيح مصادر الضوء تكنولوجيا إنتاج ضوء الليزر الذي يمتاز بتركيزه القوي واستخداماته المتعددة في عدة مجالات مثل: الطب، الترفيه والميادين العسكرية، والذي بصدد دراسته في هذا الفصل.

I-2- نبذة تاريخية:

سنة 1917 مكنت بحوث العالم ألبيرت إينشتاين Albert Einstein من وضع الأساس النظري لإنتاج ضوء الليزر، والذي أُنتج أول نموذج لجهازه على يد العالم ميمان Maiman سنة 1960 باستخدام الياقوت الأحمر الاصطناعي حيث ولد إشعاعا ليزريا نابضا أحمر اللون بطول موجي 694nm[1]، حيث يمتلك عدة خواص ميزته عن الضوء العادي، كما توالت الاكتشافات والتطورات في هذا المجال عبر السنين وأصبح التركيز على إيجاد منظومة الليزرذي المردود العالي والأقل تكلفة [2].

I-3- تعريف الليزر:

كلمة LASER هي كلمة مركبة من الحروف الأولى لعبارة:

"Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

وهي تعني "تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحفز للأشعة"، والليزر هو عبارة عن أشعة ضوئية (حزمة) مركزة ومنتظمة تشترك في خصائصها، أي أن فوتوناتها تشترك في ترددها وتتطابق موجاتها وتخضع لقوانين الضوء كالانعكاس والانكسار وله استخدامات عديدة في شتى المجالات.

الشكل(I-1): ضوء الليزر[3].

I-4- مكونات جهاز الليزر:

I-4-1- الوسط الفعال:

هوالمادة الأساسية لتوليد شعاع الليزرحيث تكون محل الانتقالات الذرية المطلوبة والتي تنتج عنها الانبعاثات الكهرو مغناطيسية (حزمة فوتونات) لإنتاج الليزر.

I-4-2- الضخ:

هو عملية نقل الطاقة من مصدرخارجي إلى الوسط الفعال المولد لشعاع الليز، حيث يعتمد بصفة أساسية على نمط التشغيل(مستمر أو نبضي) وطبيعة عنصر الضخ إن كان كيميائيا أو كهربائيا أو ضوئيا[4].

❖ أنواع الضخ:

هناك عدة أنواع من الضخ منها:

✓ **الضخ الكهربائي:**

ويستخدم فيه التيار الكهربائي (الطاقة الكهربائية) لإثارة ذرات الوسط الفعال مثل التفريغ الكهربائي للغازات وتسليط تيار كهربائي على مواد أشباه الموصلات [4] .

✓ **الضخ الكيميائي:**

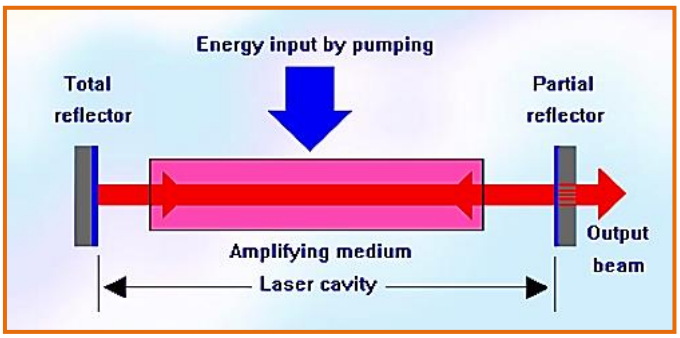
ويتم بواسطة تفاعلات كيميائية لمادة الوسط الفعال مع مواد أخرى [4].

✓ **الضخ الضوئي (الشعيع البصري):**

وهو عبارة عن تسليط الضوءعلى المواد الفعالة لتحفيزذراتها ونقلها إلى سويات أعلى وهذه التقنية تستخدم عموما في الليزرات التي تكون مادة وسطها الفعال في حالة صلبة [4].

I-4-3- المرنان:

هو منظومة مكونة من مرآتين على محوربصري واحد، أي خط مستقيم واصل بين عنصرين بصريين حيث تنتقل فوتونات الليزر بين المرآتين ذهابا وإيابا من أجل تضخيمها، تكون إحدى هاتين المرآتين ذات انعكاسية تامة 100% (الخلفية) والمرآة الأخرى تكون ذات انعكاسية جزئية أي أقل من 100 %الأمامية [4].



الشكل(I-2): مكونات جهاز الليزر[3].

I-5- أنواع الليزر:

توجد عدة أنواع من الليزر حيث تختلف حسب نوع مادة وسطها الفعال، ونذكر منها:

I-5-1- ليزر الحالة السائلة:

هو ليزر مادته الفعالة مكونة من صبغيات عضوية مذابة في الماء [5].

I-5-2- ليزر الحالة الغازية:

هو ليزر وسطه الفعال خليط من غازين ومن أشهر هذه الليزرات ليزر هليوم- نيون.

I-5-3- ليزر أشباه الموصلات:

وسطه الفعال مادة نصف موصلة - ناقلة - مثل أرسنيك الغاليوم GaAs ، وهي عموما عناصر العمود الرابع من الجدول الدوري مطعمة بأحد عناصر العمود الخامس.

I-5-4- ليزر الحالة الصلبة:

ليزر الحالة الصلبة هو أول ليزر وجد وعمل بنجاح وذلك سنة 1960 وهو ليزر الياقوت، وعموما يكون وسطه الفعال بلورة من مواد صلبة، يتم تطعيمها بموادعازلة أوقطعة زجاج لها خطوط طيفية حادة لتوليد الليزر، ففي هذا النوع من الليزر تعمل الأيونات المطعمة في البلورات الأيونية بنسبة (0.01 – 0.1)%كوسط فعال، مثل أيون الكروم Cr^{+3} في بلورات الياقوت، وأيون النوديميومNd^{+3} في الزجاج، هذه الأيونات هي المسؤولة عن توليد وتكبير شعاع الليزر[2]. يكون التشغيل عموما في هذا النوع متقطعا (الضخ) حيث يصعب إيجاد مصدر قوي لضوء إثارة قادر على تجهيز الطاقة الضوئية بصورة مستمرة وكذلك بسبب تحرر طاقة حرارية عالية وكبيرة تستلزم نمط تشغيل متقطع لضمان عملية التبريد.

I-1-4-5- أنواع ليزر الحالات الصلبة:

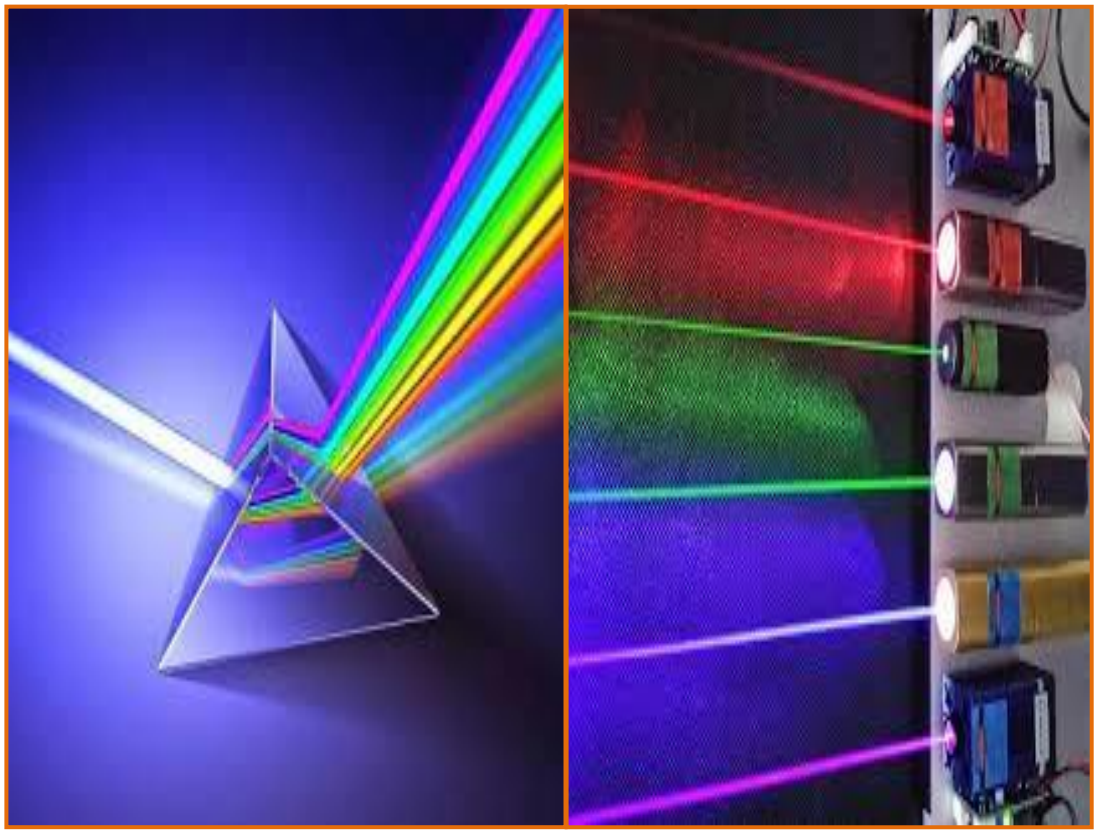
هناك أنواع مختلفة من ليزر الحالات الصلبة منها [4]:

- ليزر الياقوت laser RUBY
- ليزر النيديميوم – ياك Nd:YAG
- ليزر النديميوم – زجاج Nd:Glass

I-6- خصائص شعاع الليزر:

I-1-6- أحادية الطول الموجي:

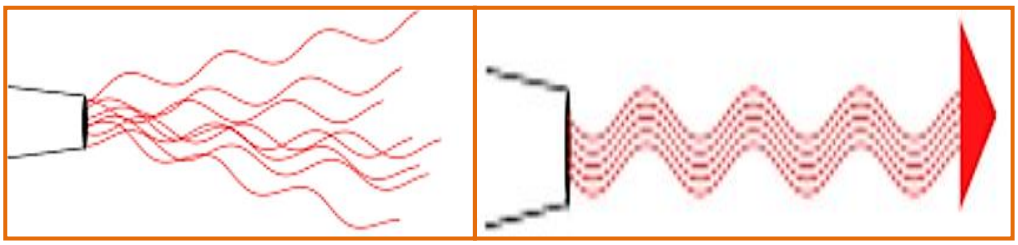
أي أن شعاع الليزر له عرض طيفي ضيق ينتج عنه طول موجي واحد و تردد منفرد[6].



الشكل(I-3): أ : ضوء ليزري. ب : ضوء عادي.

I-2-6- الترابط:

ويكون ذلك بثبات الفرق بين أي نقطتين كانت على طول شعاع موجة الليزر عند حركة الشعاع زمنيا ومكانيا، حيث يعتبرالليزر المصدر الضوئي الوحيد الذي يمتلك صفة الترابط بالمقارنة بباقي مصادر الضوء التقليدي [3].

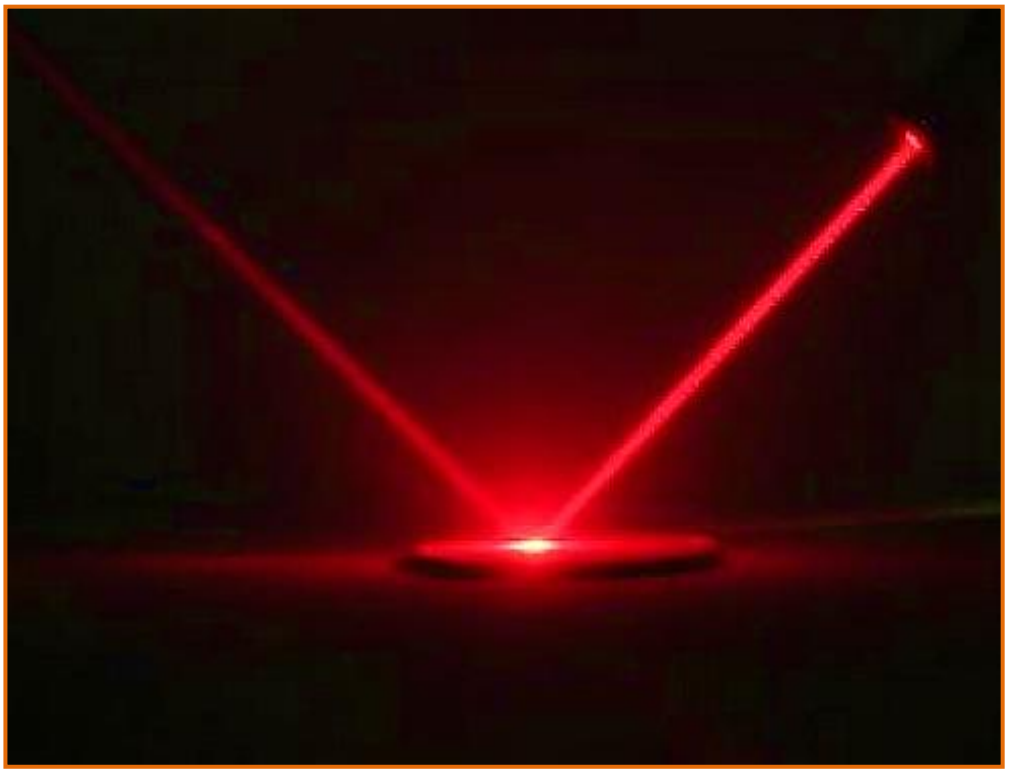


أ : ضوء ليزر مترابط. ب : ضوء عادي غير مترابط.

الشكل(I-4): الفرق بين ضوء الليزر والضوء العادي من حيث الترابط.

I-6-3- الاتجاهية:

أي أن حزمة الليزر تنتشر بإتجاه واحد ولمسافات طويلة بدون انفراجها تقريبا عن محورها أي زاوية انفراجها صغيرة جدا[7].



الشكل(I-5): اتجاهية ضوء الليزر **[3]**.

I-6-4- السطوع:

وهو كثافة قدرة شعاع الليزر في وحدة المساحة حيث تكون عالية جدا عند الليزر مقارنة بمصادر الضوء العادية، تسمى كثافة قدرة شعاع الليزرفي وحدة المساحة بالشدة (Intensity) (وعلى سبيل المثال تكون شدة مصباح التنجستن الاعتيادي ذي القدرة 100W) (حوالي $2000W/cm^2$) (بينما شعاع ليزر بنفس القدرة تصل شدته إلى حوالي $2x10^9W/cm^2$) أي أكبر بمقدار مليون مرة من مصباح التنجستن الاعتيادي[4].

I-7- تفاعل مادة إشعاع:

لفهم عمل الليزر نبدأ بالتعرف على بعض المبادئ التي تتحكم في التفاعل بين الإشعاع والمادة، لا يمكن للأنظمة الذرية أن تتواجد إلا في حالات طاقة منفصلة (مكممة) تتغير من حالة إلى أخرى وترتبط الانتقالات الذرية بداخلها بعملية امتصاص أو انبعاث لفوتون ضوئي، حيث يتم تحديد الطول الموجي للإشعاع الممتص أو المنبعث بواسطة تردد بور"bohr"حيث يعطى بالعلاقة التالية [7].

$$E_2 - E_1 = h\upsilon \qquad (1\text{-}I)$$

حيث :

- h : ثابت بلانك (Planck Constant) ويساوي ($h = 6.63x10^{-34}\ J.s$) .
- υ : تردد الفوتون .
- E_1 : طاقة المستوى الأرضي.
- E_2 : طاقة المستوى الأعلى .

تكون المادة الفعالة في حالة توازن حراري مستقر حيث أن جميع الإلكترونات تكون في المستوى الأساسي عند ورود إشعاع كهرومغناطيسي عليها بتردد مناسب، يحدث حث وتحفيز للإلكترونات وتتفاعل المادة مع هذا الإشعاع في ثلاث آليات هي الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحفز .

I-7-1- إحصاء بولتزمانBoltzman:

عند حدوث التوازن الحراري تربط علاقة بولتزمان التوزيع بين سويات الطاقة N_1 وN_2 بالعلاقة [12]:

$$N_2/N_1 = g_2/g_1 Exp(-(E_2-E_1)/KT) \qquad (2\text{-}I)$$

- N_1 : عدد الذرات في المستوي الأدني .
- N_2 : عدد الذرات في المستوي الأعلى .
- K : ثابت بولتزمان .
- T : درجة الحرارة بـ (K^0) .
- g_1 : انحلال المستوي E_1.
- g_2 : انحلال المستوي E_2.
- h : ثابت بلانك .

❖ نسبة معاملات اينشتاين:

تعطى نسبة معاملات اينشتاين بالعلاقة التالية [2] :

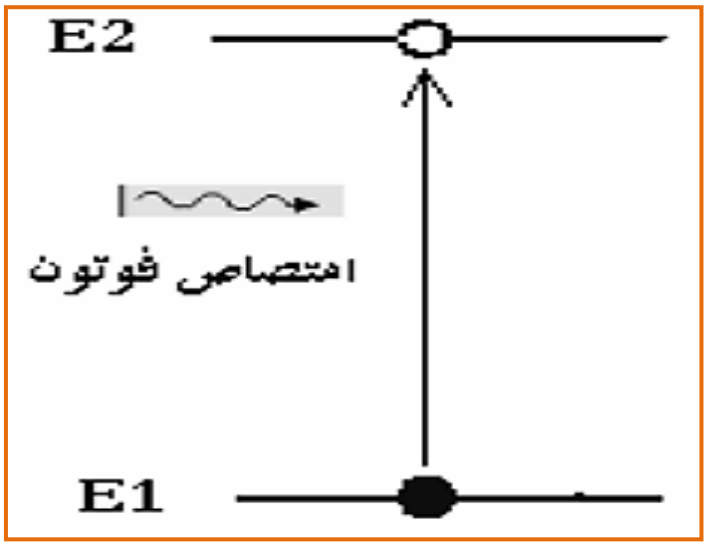
$$\frac{A}{B} = \frac{8h\pi v^3 n^3}{C^3} \qquad (3\text{-}I)$$

- n : قرينة انكسار الوسط الفعال
- c : سرعة الضوء في الفراغ حيث : $c = 3 \times 10^8$ m/s

حيث هذه النسبة تعطي فكرة عن نوع الفعل الغالب .

I-7-2- الامتصاص:

عند التوازن الحراري، حالات الطاقة المنخفضة E_1 في الوسط أكثر كثافة من مستويات الطاقة العليا E_2، تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع الوسط الليزري الفعال سوف يرفع عدد الذرات من المستوي الأدنى إلى المستوى الأعلى وعليه يحدث الامتصاص ، في هذه الحالة سوف يتم استنفاد المستويات الدنيا N_1 بمعدل يتناسب مع كثافة الإشعاع ومع عدد الإسكان في هذا المستوى[10] مع العلم أن : $E_1 < E_2$ وهذا ما يوضحه الشكل(I-6).



الشكل(I-6): مخطط آلية الامتصاص.

والمعادلة التالية توضح معدل الامتصاص من السوية E_1 إلى السوية E_2 [13]

$$\frac{dN1}{dt} = -B_{12}\rho(\upsilon)N_1 = -W_{12}N_1 \qquad (4\text{-}I)$$

حيث :

$\frac{dN1}{dt}$: معدل الامتصاص

W_{12}: احتمال الامتصاص من السوية 1 إلى السوية 2

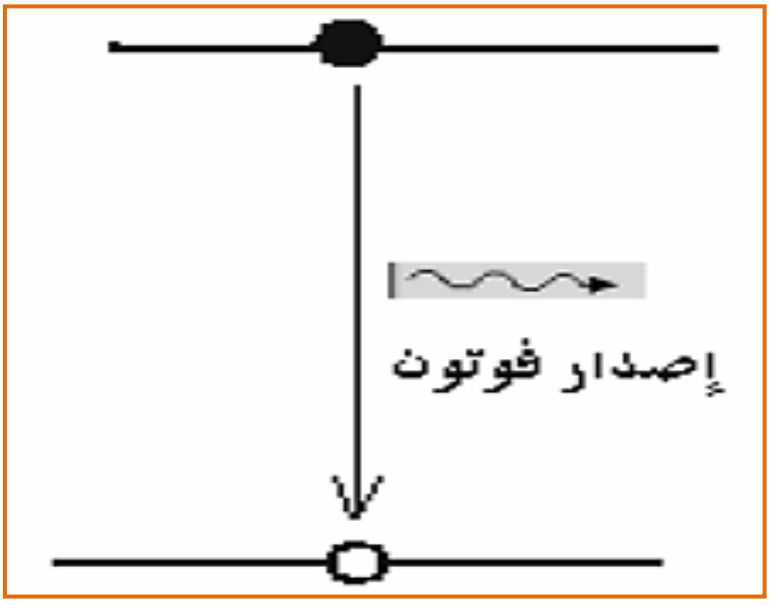
B_{12}: معامل اينشتاين لعملية الامتصاص.

$\rho(\upsilon)$: كثافة طاقة الإشعاع الوارد .

N_1 : إسكان السوية E_1 .

I-3-7- الانبعاث التلقائي:

بعد ما ترتفع الذرة إلى المستوى الأعلى بواسطة الامتصاص، يضمحل الإسكان في المستوي العلوي بشكل عفوي (تلقائي) إلى المستوى الأدنى مع فقدها للطاقة التي تتحول إلى أضواء(فوتونات) بحيث تعود الإلكترونات إلى وضع الاستقرار الأساسي[12]



الشكل(I-7): مخطط آلية الانبعاث التلقائي.

والمعادلة التالية توضح معدل الانبعاث التلقائي من السوية E_2 إلى السوية E_1 [13]

$$\frac{dN2}{dt}=-A_{21}N_2 \quad =-A_{21}N_2=(1/\tau_{21})N_1 \qquad (5\text{-}I)$$

حيث :

$\frac{dN2}{dt}$: نسبة الانبعاث التلقائي

A_{12} : معامل اينشتاين لعملية الانبعاث التلقائي .

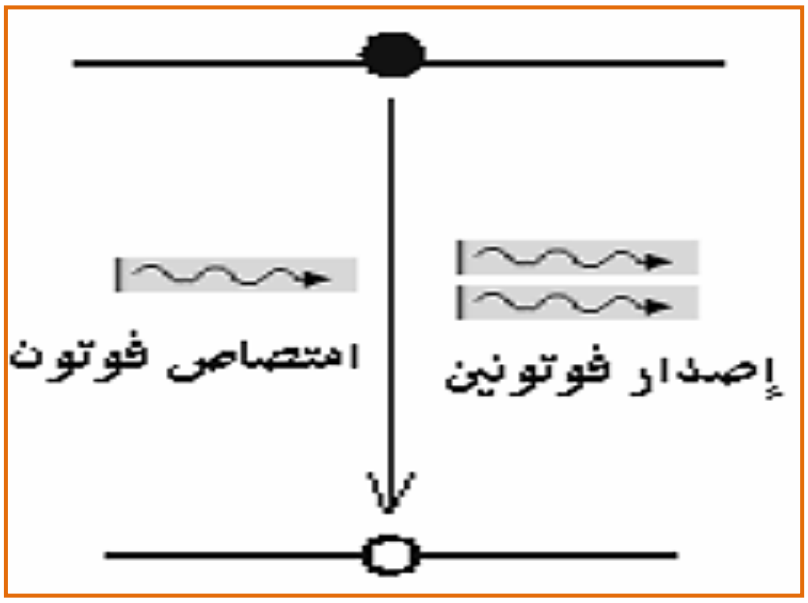
N_1 : إسكان السوية E_1 .

N_2 : إسكان السوية E_2 .

τ_{21} : زمن المكوث في السوية E_2 حيث $A_{21}=1 / \tau_{21}$.

I-4-7- الانبعاث المحفز:

ويحدث تحت التحفيز بواسطة الإشعاع الكهرومغناطيسي (حزمة فوتونات) حيث عندما تكون ذرات المادة مثارة أي أن الالكترونات تكون في المستوي المثار E_2، ويمر بها فوتون وارد ذو تردد مناسب وبطاقة $E_2 - E_1 = h\upsilon$ يحفزها للنزول إلى المستوى الأساسي الأدنى E_1 قبل انتهاء زمن مكوثها في تلك الطبقة العليا، محررا فوتونا واحدا يملك نفس المقدار من الطاقة وبنفس الخصائص الموجية مع الفوتون الوارد [12]



الشكل(I-8): مخطط لآلية الانبعاث المحفز.

والمعادلة التالية توضح معدل الانبعاث المحفز من السوية E_2 إلى السوية E_1 [13].

$$\frac{dN2}{dt} = -B_{21}\rho(\upsilon)N_2 = -W_{21}N_2 \qquad (6\text{-}I)$$

حيث :

$\frac{dN2}{dt}$:نسبة الانبعاث المحفز .

B_{21} : معامل اينشتاين للانبعاث المحفز.

$\rho(\upsilon)$: كثافة الإشعاع الصادر.

W_{21} : احتمال الانبعاث المحفز لوحدة الزمن .

N_2: إسكان السوية E_2.

I-7-4-1- شروط الانبعا ث الليزري:

I-7-4-1-1- الانبعاث المحفز:

تكون غالبية الذرات في الظروف الطبيعية ذات إلكترونات مستقرة وفي مستوى طاقة منخفض، كما يمكن أن يكون بعضها في حالة إثارة أي تكون في مستويات طاقة أعلى ، يمكن أن تعود هذه الالكترونات المثارة إلى مستويات الطاقة الدنيا محررة طاقة على شكل فوتونات حيث يمكن أن يكون هذا الرجوع محفزا بواسطة فوتون خارجي وهذا ما يسمح بحصول عملية تضخيم الأضواء**[6]**.

I-7-4-1-2- التكبير الضوئي:

تمكننا عملية الانبعاث المحفز من حدوث ظاهرة تضخيم الأضواء، حيث يسمح تحفيز الالكترونات المثارة من إنتاج انبعاث مضاعف لكل من الفوتونات المحفزة و الفوتونات الناتجة عن رجوع الاكترونات المثارة إلى سويات الطاقة الدنيا (حالة الاستقرار)**[6]** .

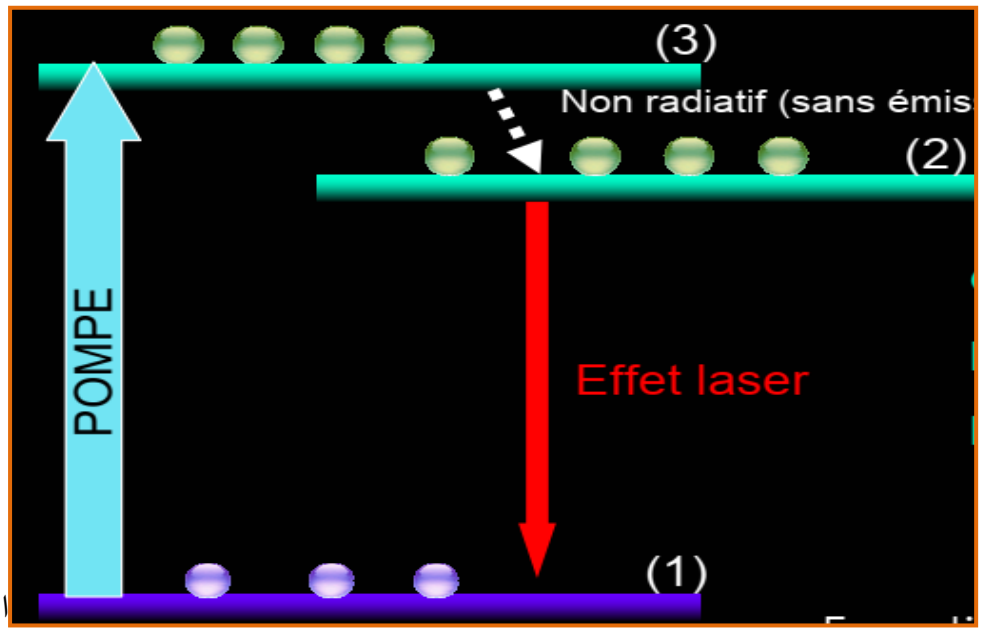
I-7-4-1-3- الانقلاب السكاني:

وهو أن يكون عدد الإلكترونات في الحالة المثارة أكثر منه في الحالة المستقرة ويتم ذلك بتسليط إشعاع ضوئي على الوسط الفعال أي العمل على عكس الحالة الطبيعية للمادة وهو شرط أساسي لتوليد ضوء الليزر حيث يعمل على ضمان أن يكون الانبعاث الغالب هو الانبعاث المحفز (تضخيم الأضواء) **[6].**

I-8- أنواع الأنظمة الليزرية:

I-8-1- نظام ثلاثي السويات:

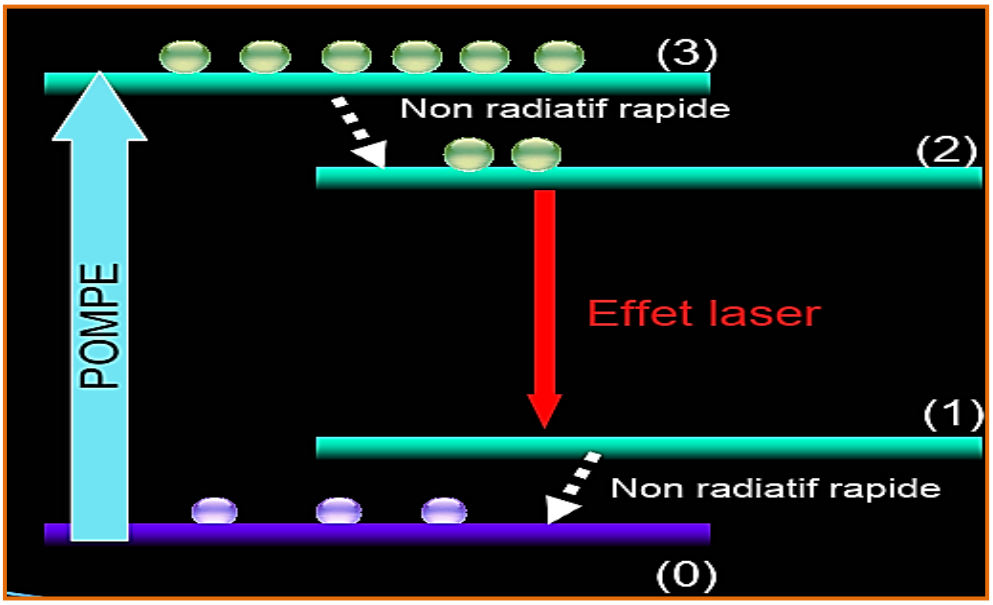
يتم توليد ضوء الليزر فيها عبر انتقال ذرات الوسط الفعال بين 3 مستويات للطاقة هي ($E_1.E_2.E_3$) حيث E_1 هو المستوى الأرضي (المستوي الليزري السفلي) وE_2 هو مستوي شبه مستقر (المستوي الليزري العلوي) وE_3 المستوي المثار. تكون مدة الحياة للمستويE_2 أكبر من مدة الحياة للمستوي E_3.يكون الوسط الفعال في حالة استقرر، أي أن معظم ذراته موجودة في المستوي السفلي المستقرE_1 وحين إثارة هذه المادة بإحدى الطرق المناسبة، تنتقل الذرات إلى المستوى المثار E_3 ثم تتخامد بشكل تلقائي وسريع إلي المستوى شبه المستقرE_2 محررة طاقة على شكل حرارة . وبعد ذلك تعود إلى المستوي الأرضي E_1 محررة طاقة على شكل انبعاث ليزري ، وفي هذا النوع من النظام (منظومة ثلاثية) ينبغي أن تكون طاقة الإثارة كافية لتحقيق عملية الانقلاب الإسكاني الضروري في الانبعاث الليزري[8].



الشكل(I-9): مخطط ليزر ثلاثي السويات.

I-8-2- نظام رباعي السويات:

ومن أبرز مميزاته وجود مستوى إضافي (نسميه E_1) يجعل من السهل الحصول على عملية الانقلاب الإسكاني وبطاقة ضخ ضعيفة نسبيا، حيث يكون E_1 فارغا في الغالب مما يجعله يمثل المستوي الليزري السفلي، حيث عند إثارة المادة الفعالة تنتقل الذرات إلى المستوي E_3 ثم تنزل بسرعة (تتخامد) تلقائيا إلى المستوي E_2 محررة طاقة حرارية. تكون مدة حياة المستوي E_2 أكبر من مدة حياة المستوي E_1 مما يترتب عليه التفريغ السريع لهذا الأخير (المستوي E_1) نحو المستوي الأرضي E_0 مباشرة، مما ينتج تجميع للإلكترونات في المستوي E_2 على حساب المستويE_1 ومنه حدوث الانقلاب الإسكاني بينهما عند انتقال الالكترونات الموجودة في المستوي E_2 إلى المستوي E_1 تنبعث حزمة فوتونات الليزر**[8].**



الشكل(I-10): مخطط ليزر رباعي السوية.

I-3-8- مقارنة بين النظام ثلاثي المستوي والرباعي المستوي في المنظومة الليزرية:

يمثل الجدول التالي الخصائص المميزة لكل نظام والفروق الأساسية بينها:

الجدول(I-1): مقارنة بين النظام ثلاثي المستوي ورباعي المستوي في المنظومة الليزرية [4].

نظام المستويات الثلاثية	نظام المستويات الرباعية
يتكون من ثلاث مستويات	يتكون من أربع مستويات
يتطلب ضخ نصف عدد الذرات من المستوي الأرضي إلى المستوي المتهيج للحصول على التوزيع المعكوس	يتطلب ضخ عدد قليل من الذرا ت من المستوي الأرضي إلى المستوي المتهيج للحصول على التوزيع المعكوس
المستوي الأرضي هو نفسه المستوي الليزري السفلي	المستوي الأرضي ليس هو المستوي الليزري السفلي
يحدث الفعل الليزري بين E_1 و E_2	يحدث الفعل الليزري بين E_3 و E_2
يحتاج إلى مصدر طاقة ضخ عالية	لا يحتاج إلى مصدر لطاقة ضخ عالية
عمر المستوي E_3 صغير جدا	عمر المستوي E_3 صغير جدا
عمر المستوي E_2 طويل	عمر المستوي E_2 طويل نسبيا
يحدث انتقال سريع بين E_3 و E_2	يحدث انتقال سريع بين E_3وE_2
أقل كفاءة من نظام المستويات الرباعية	أعلى كفاءة من نظام المستويات الثلاثية
تحت شرط التوازن الحراري تكون N_2 قليلة جدا	تحت شرط التوازن الحراري تكون N_2 و N_1قليلة جدا
لا يوجد انتقال بين المستوي E_2 والمستوي الأرضي	يوجد انتقال بين المستوي E_1 والمستوي الأرضي

I-9- تطبيقات الليزر:

يطبق الليزر في عدة مجالات نذكر منها **[9]**:

- ✓ المجال العسكري : التتبع والتوجيه وتقدير المدى .....
- ✓ التطبيقات الطبية والحيوية : أمراض العين، الجراحة، والتجميل، الاستئصال ....
- ✓ المجالات الصناعية : القطع والتثقيب واللحام .....
- ✓ المجالات التجارية : الأقلام الضوئية، الطابعات الليزرية، قارئات الأقراص ....
- ✓ الاتصالات البصرية : الألياف البصرية.

I-10- خلاصة:

في هذا الفصل قمنا بتقديم نبذة تاريخية عن ضوء الليزر حيث قمنا بتعريفه وذكر مكونات جهازه وكذا أنواع وخصائص أشعته الليزرية كما ناقشنا أهم الطرق المستعملة في توليده والتي تعتبر من أهمها القيام بعملية الضخ عن طريق الأشعة الشمسية والتي تمثل مصدرا وفيرا ومتجددا للطاقة.

الفصل الثاني يقدم لمحة عامة حول الإشعاع الشمسي وليزرات الحالة الصلبة المستعملة كأوساط فعالة لإنتاج الليزر الشمسي ويناقش إمكانية رفع نسبة التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص للوسط الفعال الضعيفة والضيقة والتي تقدر بـ 16 % [14]وذلك باللجوء إلى التطعيم المضاعف بواسطة أيونات الكروم Cr^{+3} و السيريوم Ce^{+3}.

قائمة مراجع الفصل الأول

❖ المراجع العربية:

[1] بيلّا آ.لينكيل .ترجمة فاروق عبودي قيصر ،" الليزرات "،كتاب صار عن دار الكتب للطباعة و النشر ،الموصل العراق ص 66 (1984)

[2] محمد الكوسا ،" فيزياء الليزر وتطبيقاته" ، كتاب رقمي صادر عن كلية العلوم ،منشورات جامعة دمشق،سوريا،ص ص 53-54 (2006) .

[3] حازم فلاح السكيك "سلسلة محاضرات فيزياء الليزر وتطبيقاته "من اصدارات أكادمية الفيزياء القسم الالكتروني جامعة الأزهر غزة ص 7(2015).

[4] عدي عطا حمدي ،" أساسيات الليزر وتطبيقاته لطلبة الدبلوم الفني في الاتصالات "، كتاب صادر عن دار الكندي للنشر والتوزيع ،عمان ،الأردن ،ص ص 19-43 (2004).

[5] س. بريك هيتز، "تفهم تكنولوجيا الليزر" ت رياض عزيزة مرزه ،الطبعة الثانية ص263(2021)

[6] سعود بن عبد الحميد اللحياني ،" الليزر وتطبيقاته "، كتاب صادر عن كلية العلوم ،منشورات جامعة أم القرى،المملكة العربية السعودية ،ص (2008)

[7] رائد خضرسلمان الفهداوي ،" محاضرات الليزر"، جامعة الانبار(2016/2015)

[8] مالك أحمد يونس "فيزياء الليزر وتطبيقاته"منشورات جامعة البعث كلية العلوم مديرية الكتب والمطبوعات ص70-73(2007 -2008)

[9] نور الدين حمروني ،" ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين" ، أطروحة دكتورا ،جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي،الجزائر ص ص50-52(2021).

❖ المراجع الأجنبية:

[10] BRUNO DIOGO RODRIGUES MATOS TIBURCIO " SOLAR-PUMPED LASER TECHNOLOGY".DOUTORQ;ENTO EM ENGENHARIA FISICA Universide NOVA de Lisbona MARCO p5 .(2022)

[11] sebastien FORGET" Les LASERS et leurs application" ,labortoire de physique des lasers ,Universite de Nord-Paris

[12] W .Koechner and M. Bass "Solid –State Lasers :A Graduate Text(Advenced Texts in Physics)."Springer Science & Business Media,USA p.p15-20 (2006).

[13] Orazio svelto ,TDAVID C. Hanna,"principle of lasers" fourth eddition, polytechnic Institut of mian and National Reseach council milan,Italy p 3(1998)

[14]D.Liang,J.Almeida,D.Garcia,B.D.Tburcio,E.Guillott,and C.R.Vista,"Simultaneous solar laser emissions from three Nd:YAG rods withen a single pum cavity, "Sol.Energy,vol.199,pp192-197(2020)

الفصل الثاني

الليزر الشمسي وليزرات الحالة الصلبة

II-1- تمهيد:

تعتبر الطاقة الشمسية من أفضل مصادر الطاقة التي يمكن للبشر استغلالها، حيث تمتاز بأنها طاقة نظيفة ومستدامة وغير ملوثة للبيئة خلافا لمصادر الطاقات الأخرى، مثل النفط والطاقة النووية، ولذلك ارتفعت مكانتها وتعددت استخداماتها، ومن أبرز هذه الاستخدامات مجال الليزر الشمسي "solar pumped laser"

أو ما يعرف اختصارا بـ "SPL " حيث يمثل أحد فروع التكنولوجيا الحديثة وقد تطور هذا المجال انطلاقا من دمج علمي للطاقة الشمسية و فيزياء الليزر.

II-2- الإشعاع الشمسي:

تمثل الشمس مركز المجموعة الشمسية ،وهي أكبر من كواكب المجموعة مجتمعة ويبلغ وزن الشمس حوالي:

$M_s = 1.986\times10^{30}$ kg أما قطرها فيبلغ حوالي $D_S = 1.4\times10^{6}$ km [1] .

تنطلق الأشعة الشمسية على شكل فوتونات بسرعة الضوء $c = 3\times10^{8}$ m/s على شكل موجات مستعرضة حيث لكل فوتون طول موجي λ وطاقة E تتناسب عكسيا مع هذا الأخير (الطول الموجي) حسب نظرية بلانك كما توضح المعادلة التالية

$$E = h\upsilon = \frac{hc}{\lambda} \qquad (1\text{-}II)$$

حيث:

C: سرعة الضوء في الفراغ .

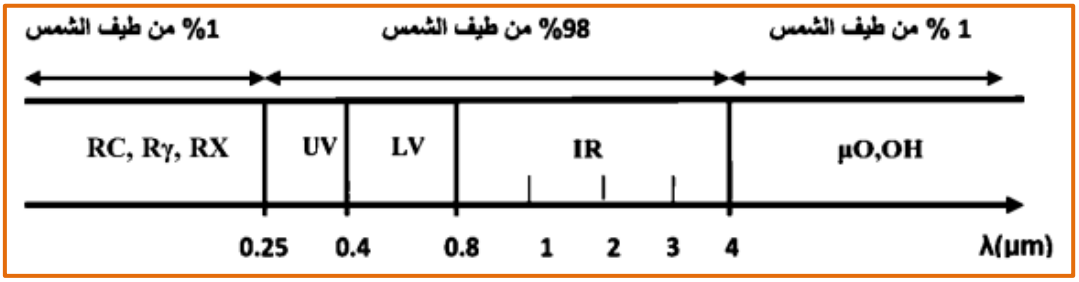
h : ثابت بلانك .

λ : الطول الموجي .

υ : تردد الإشعاع .

II-3- طيف الإشعاع الشمسي:

يتميز طيف الإشعاع الشمسي الصادر عن الشمس بموجات ذات أطوال موجية λ مختلفة، تكون غالبيتها على شكل أمواج كهرومغناطيسية حيث تتوزع غالبية طاقتها أي حوالي 98 % ، في مجال واحد من طيف الإشعاع الشمسي، بينما نجد 1 % فوق هذا المجال و1% تحته كما يبين الشكل الآتي:



الشكل(II-1): جدول يوضح طيف الاشعاع الشمسي [2].

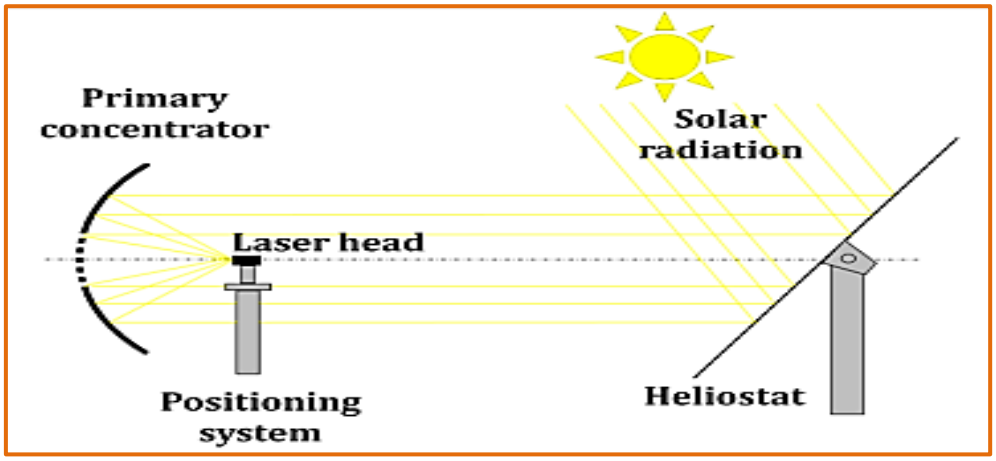
- $\lambda\in[0.25,0.4]\mu m$: المجال فوق بنفسجي يمثل6 % من الإشعاع الكلي المنبعث من الشمس.
- $\lambda\in[0.4,0.8]\mu m$: المجال المرئي يمثل 47% من الإشعاع الكلي المنبعث من الشمس .
- $\lambda\in[0.8, 4]\mu m$: المجال تحت الأحمريمثل 45% من الإشعاع الكلي المنبعث من الشمس.

- RC:الأشعةالكونية.
- Rγ:الأشعةغاما.
- RX: الأشعة السينية.
- OH:الأشعة الراديوية.
- μO: أشعة المايكروايف[2].

II-4- تعريف الليزر الشمسي:

هو عبارة عن ليزر يستخدم الطاقة الشمسية كوسيلة للضخ و يرمز له اختصارا "SPL" له نفس خصائص الليزر الذي يضخ بواسطة الطاقات الأخرى ويتميز عنها بتركيبه الأبسط وإشعاعه القوي وذلك بسبب الإزالة الكاملة لعديد المعدات الإضافية على غرار الليزرات التي تعمل بالكهرباء.

يعتمد مبدأ عمله على تركيز الإشعاع الشمسي عريض النطاق وتحويله إلى إشعاع ليزري ضيق النطاق متماسك ومتوازي[7].



الشكل(II-2): منظومة الليزر الشمسي [8].

II-5- مكونات تقنية الليزرالشمسي:

تتكون منظومة الليزرالشمسي من عدة مكونات وأجزاء لكل منها دورأساسي في إنتاج الشعاع الليزري ويمكن تصنيفها كما يلي :

- منظومة التركيزالأولية.
- منظومة التركيزالثانوية.
- منظومة التتبع الشمسي.
- منظومة التبريد.
- الوسط الفعال.
- التجويف الرنيني(المرنان).

II-5-1- منظومة التركيزالأولية:

يُستعمل ضوء الشمس في عملية الضخ عند الليزرالشمسي، وبما أن ضوء الشمس تدفقه غير كاف لإثارة الوسط الفعال لنظام الليزر فإنه يلزم هنا عامل تركيز للحصول على مكاسب كافية في الوسط الفعال المشع، لذلك من الضروري الاستعانة بمركزات شمسية حيث توجد عدة أنواع من المركزات الشمسية على سبيل المثال نستعمل المرايا القطعية المكافئية أوجهاز يتكون من عدسات فرينيل لتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي الوارد[2].

II-5-2- منظومة التركيزالثانوية:

بما أن قطرقضيب الليزرصغير، فإننا نحتاج لمركزات أخرى لتوجيه ضوء الشمس نحوه، كما تلعب هذه المركزات دورالتجويف الذي يجتازه ماء التبريد[2].

II-5-3- منظومة التتبع الشمسية:

يتكون نظام التتبع الشمسي من دارات تحكم إلكترونية وعناصر ميكانيكية توجه المركز الشمسي أو المرايا العاكسة نحو الشمس في جميع الاتجاهات من شروق الشمس إلى غروبها[2].

II-5-4- منظومة التبريد:

عند مرور ضوء الشمس المركَّزعبر بلورة الليزرفإنه تمتص جزءا منه وتنتج ضوءا متماسكا، لكن هذا التحويل لا يحدث 100 %، بل على أقصى حد يتحول بنسبة 30 % من الضوء الساقط إلى ضوء الليزر، والباقي يتحول إلى حرارة تؤدي إلى إتلاف الوسط الفعال وانخفاض في تحويلها البصري، ومنه فمن الضروري تبريد الوسط الفعال، وعادة يقع التبريد بالماء[2].

II-5-5- الوسط الليزري الفعال:

المادة الفعالة الاساسية المسؤولة عن الفعل الليزري وموقع الانتقالات الإلكترونية.

II-6-5- التجويف الرنيني(المرنان):

عملية التضخيم تتطلب وجود تغذية عكسية راجعة لإدامة التذبذب، وإن التغذية العكسية في منظومة الليزرتكون باستخدام تجويف بصري يسمى المرنان ويتكون من مرآتين تنتقل بينهما الفوتونات ذهابا وإيابا على طول المحورالبصري للتجويف[2].

II-6- الضخ:

قدم الليزر مصدرا رائعا للضوء أحادي اللون تسمى تقنية توليد إشعاع الليزربالضخ ويكون الضخ إما كهربائيا أو كيميائيا أو ضوئيا...والضخ الضوئي هو تعريض الوسط الفعال للضوء الشمسي المركزوبالتالي إنتاج الليزرالشمسي[8].

II-6-1- أنواع الضخ:

II-6-1-1- الضخ غيرالمباشر:

عند تشغيل النظام الكهربائي بواسطة الطاقة الشمسية ويستخدم لضخ وسط الليزر، هذا النوع من الضخ يسمى ضخ غير مباشر حيث يكون النظام الكهربائي عبارة عن محول كهربائي يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية [8].

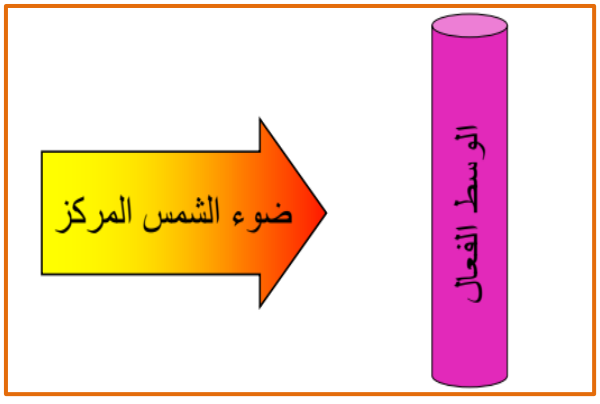
II-6-1-2- الضخ المباشر:

يمكن ضخ الليزر بشكل مباشر من ضوء الشمس وذلك عن طريق وضع رأس الليزرفي البقعة البؤرية لمركزشمسي أولي لأن ضوء الشمس المباشرتدفقه غيركاف لإحداث الفعل الليزري [2].

II-6-2- آليات الضخ:

II-6-2-1- الضخ الجانبي:

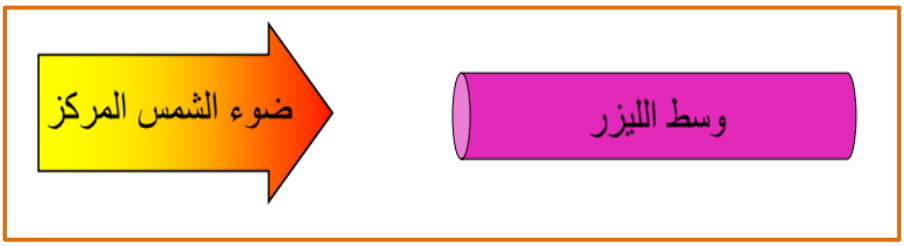
في هذه الحالة يوجه الضوء المحفز نحو الجهات الجانبية لليزروهذا ما يجعل امتصاص الضوء يكون موزعا بانتظام على طول القضيب.



الشكل(II-3): رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزرالشمسي [2].

II-6-2-2- الضخ على الطرف:

في هذا النوع من الضخ ترسل الأضواء نحو قضيب الليزرمن أطرافه مما يؤدي إلى توبع غيرمنتظم لهذه الأضواء الممتصة داخل القضيب.يؤدي الترسيب الحراري الناتج عن هذا النوع من الضخ إلى درجات حرارة غيرموزعة بانتظام مما يؤثربالسلب على كفاءة هذا النظام [2].



الشكل(II-4): تخطيط لمبدأ الضخ على الطرف في الليزر الشمسي [2].

II-7- ليزرات الحالة الصلبة:

وهي عبارة عن ليزرات تكون مادتها المضيفة عبارة عن مواد صلبة إما بلورية أو زجاجية، حيث تكون المادة الفعالة فيها غالبا أيونات شائبة مثل أيونات الفلز الانتقالي(Cr^{+3}) أو أيونات الأتربة النادرة مثل Nd^{+3}،Ce^{+3}...وتكون هذه الأيونات الشائبة داخل البلورات الأيونية في ليزرات الحالة الصلبة.

حدوث الانقلاب السكاني في هذا النوع من الليزر يضمن إيجاد مقطع إصدارمستحث كبيرنوعا ما أي أن الانتقالات نحو الطبقات الداخلية تكون حادة كما يجعل عمرالإثارة طويلا نسبيا مما ينقص عدد الانتقالات غيرالمشعة في الطبقات الداخلية[3].

II-7-1- خصائص المواد الصلبة:

يجب أن تمتلك المواد المستعملة في أنشطة الليزرخطوط فلورة رفيعة ونطاقا عريضا للامتصاص وكفاءة كمية عالية لانتقالات الفلورة وعتبة ضخ منخفضة.

هذه الخصائص عموما موجودة في المواد الصلبة (البلورات أو الزجاج) والتي يمكن دمجها بكميات صغيرة مع العناصرالتي تحدث فيها التحولات الضوئية بين الحالات الالكترونية، ومنه فإن المعادن الانتقالية والأتربة النادرة هي التي تناسب هذه الحالة [8].

II-7-2- أيونات الاتربة النادرة:

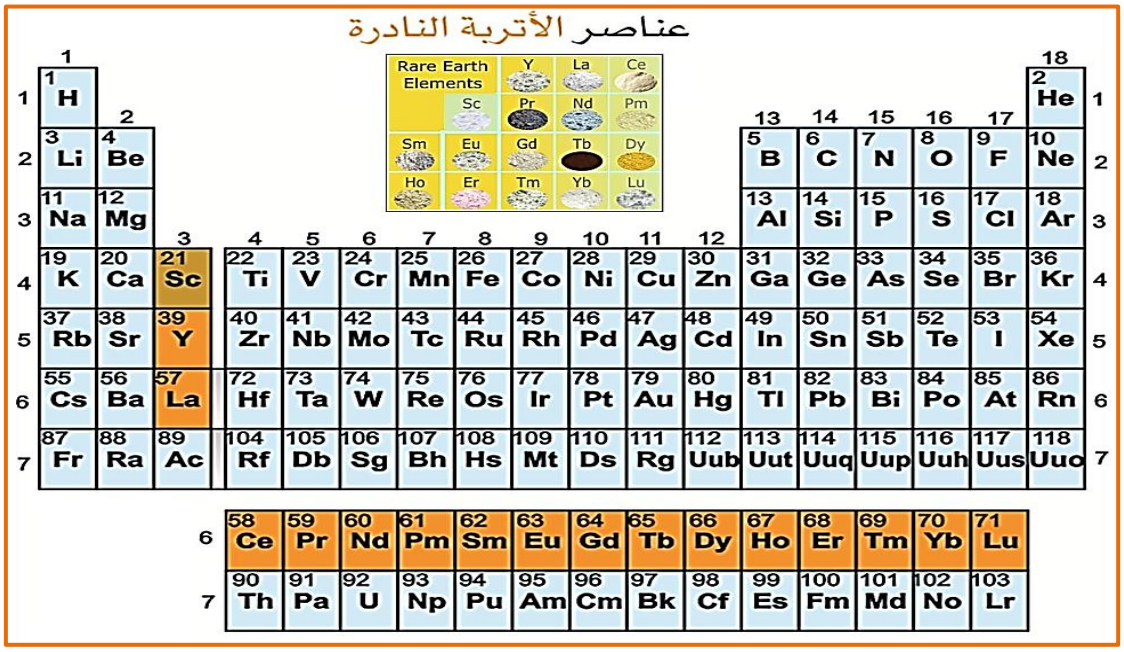
و تعتبر مواد ليزرية جيدة،حيث عناصر الأتربة النادرة هي مجموعة من17 عنصرامعدنيا متشابها كيميائيا وهي تقع في الجدول الدوري بعد عنصر الزينون(xenon) حيث عددها الدوري يبدأ من Z(lanthane)=57 الى Z(lutecium)=71 ويكون توزيعها الالكتروني في الحالة المتعادلة كما يلي:

$$[Xe]\ 4P^{n}\ 5d^{0}\ 6S^{2} \qquad n:0 \longrightarrow 14 \qquad (2\text{-}II)$$

مع العلم أن:

$$[Xe]: 1S^2 2S^2 2P^6 3S^2\ 3P^6\ 3d^{10}\ 4S^2\ 4P^6\ 4d^{10}\ 5S^2\ 5P^6 \qquad (3\text{-II})$$

وتعتبر أيونات هذه العناصر، عناصر ليزرية ممتازة مع بعض البلورات [9]، [1].



الشكل(II-5): موقع عناصر الأتربة النادرة في الجدول الدوري [25].

II-3-7- التوزيع الالكتروني للأتربة النادرة وأيوناتها:

تمتلك الطبقات الرئيسية للأتربة النادرة أعدادا كمية رئيسية قيمتها n تساوي 1 او 2 او 3 وهي مليئة تماما، أما الطبقة التي n=4 تكون طبقاتها الثانوية 4f فارغة تماما بالرغم من أنه يمكن إسكان 14 إلكترون في المدارات 5P 5S ومنه يكون التوزيع لعنصر Xenon كالتالي:

$$[Xe]: 1S^2 2S^2 2P^6 3S^2\ 3P^6\ 3d^{10}\ 4S^2\ 4P^6\ 4d^{10}\ 5S^2\ 5P^6 \qquad (4\text{-II})$$

أما العناصر الواقعة بعد هذا العنصر فهي تمتلك نفس التوزيع بالإضافة إلى امتلاكها إلكترونات في المدارات 5d و4f و6S وتحدث الإضافة الأولى ليس في المدارات الداخلية 4f بل في المدارات الخارجية 6S [4][10].

على سبيل المثال أول عنصر من هذه العناصر هو السيريوم(Ce) الذي يملك إلكترونا واحد في المدار f:

$$Ce:.....4f^1\ 5S^2\ 5p^6\ 5d\ 6s^2 \qquad (5\text{-II})$$

وأهم عنصر هو النيوديميوم (Nd) لديه 4 إلكترونات في المدار f:

$$Nd: .....4f^4\ 5s^2\ 5p^6\ 6s^2 \qquad (6\text{-II})$$

يوضح الجدول الأول التوزيع الالكتروني لذرات الأتربة النادرة:

Atomic number	Element symbol and name	Valence configuration of element	Term symbol of element	Valence configuration of Ln^{III}	Term symbol of Ln^{III}	Valence configuration of Ln^{II}	Valence configuration of Ln^{IV}
57	La—lanthanum	$[Xe]5d^16s^2$	$^2D_{3/2}$	[Xe]	$^1S_0$	$[Xe]5d^1$	$[Kr]4d^{10}5s^25p^5$
58	Ce—cerium	$[Xe]4f^15d^16s^2$	$^3H_4$	$[Xe]4f^1$	$^2F_{5/2}$	$[Xe]4f^2$	[Xe]
59	Pr—praseodymium	$[Xe]4f^36s^2$	$^4I_{9/2}$	$[Xe]4f^2$	$^3H_4$	$[Xe]4f^3$	$[Xe]4f^1$
60	Nd—neodymium	$[Xe]4f^46s^2$	$^5I_4$	$[Xe]4f^3$	$^4I_{9/2}$	$[Xe]4f^4$	$[Xe]4f^2$
61	Pm—promethium	$[Xe]4f^56s^2$	$^6H_{5/2}$	$[Xe]4f^4$	$^5I_4$	$[Xe]4f^5$	$[Xe]4f^3$
62	Sm—samarium	$[Xe]4f^66s^2$	$^7F_0$	$[Xe]4f^5$	$^6H_{5/2}$	$[Xe]4f^6$	$[Xe]4f^4$
63	Eu—europium	$[Xe]4f^76s^2$	$^8S_{7/2}$	$[Xe]4f^6$	$^7F_0$	$[Xe]4f^7$	$[Xe]4f^5$
64	Gd—gadolinium	$[Xe]4f^75d^16s^2$	$^9D_2$	$[Xe]4f^7$	$^8S_{7/2}$	$[Xe]4f^75d^1$	$[Xe]4f^6$
65	Tb—terbium	$[Xe]4f^96s^2$	$^6H_{15/2}$	$[Xe]4f^8$	$^7F_6$	$[Xe]4f^9$	$[Xe]4f^7$
66	Dy—dysprosium	$[Xe]4f^{10}6s^2$	$^5I_8$	$[Xe]4f^9$	$^6H_{15/2}$	$[Xe]4f^{10}$	$[Xe]4f^8$
67	Ho—holmium	$[Xe]4f^{11}6s^2$	$^4I_{15/2}$	$[Xe]4f^{10}$	$^5I_8$	$[Xe]4f^{11}$	$[Xe]4f^9$
68	Er—erbium	$[Xe]4f^{12}6s^2$	$^3H_6$	$[Xe]4f^{11}$	$^4I_{15/2}$	$[Xe]4f^{12}$	$[Xe]4f^{10}$
69	Tm—thulium	$[Xe]4f^{13}6s^2$	$^2F_{7/2}$	$[Xe]4f^{12}$	$^3H_6$	$[Xe]4f^{13}$	$[Xe]4f^{11}$
70	Yb—ytterbium	$[Xe]4f^{14}6s^2$	$^1S_0$	$[Xe]4f^{13}$	$^2F_{7/2}$	$[Xe]4f^{14}$	$[Xe]4f^{12}$
71	Lu—lutetium	$[Xe]4f^{14}5d^16s^2$	$^2D_{5/2}$	$[Xe]4f^{14}$	$^1S_0$	$[Xe]4f^{14}6s^1$	$[Xe]4f^{13}$

الجدول(II-1): التوزيع الالكتروني لذرات الأتربة النادرة [9].

أما الجدول الثاني فيعرض نطاق الامتصاص والإصدار لبعض عناصر الأتربة النادرة:

الرمز	العنصر	λ_{em}(nm)	λ_{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 (إتيربيوم)	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

الجدول(II-2): نطاق الامتصاص والإصدار لبعض الاتربة النادرة وبعض الأوساط الليزرية [3].

II-7-4- خصائص المواد المضيفة لعناصر الاتربة النادرة:

ينبغي للمواد المضيفة منح الظروف المناسبة لأيونات الأتربة النادرة المكون الأساسي للفعل الليزري، حيث وجب توفير الخصائص الديناميكية والضوئية الجيدة، موصلية حرارية عالية وكفاءة جيدة لتبديد الحرارة، وذلك لتحمل العوامل الصعبة المصاحبة لعملية توليد الليزرونلخص أهم المميزات في النقاط التالية[10]:

- مقطع إصدار ليزري كبير.
- عمر إثارة طويل.
- عتبة ضخ منخفضة.
- موصلية وناقلية حرارية جيدة (لمقاومة الحرارة العالية المتولدة داخل الوسط الفعال)
- الصلابة والخمول الكيميائي.

- الوفرة وسهولة التصنيع.

II-7-5- المادة المضيفةعقيق الألمنيوم الإيتريوم (YAG):

- يطلق عليه اختصارا(YAG) وهي كلمة مختصرة للعبارة "yttirinium Aluminium garnet"
- يعتبر عقيق الألمنيوم و الايتريوم من بين أهم المواد المضيفة المستخدمة لنظام الليزر، وهو عبارة عن مادة بلورية اصطناعية من مجموع العقيق ، رمزه ($Y_3Al_5O_{12}$, YAG) ويتمثل في طور أكسيد الإيتيريم والألمنيوم المكعب ، تتميز هذه البلورة بصلابتها العالية ومقاومتها للمواد الكيمائية والحرارة بصفة جيدة .
- كذلك يستخدم عقيق الألمنيوم والإيتريوم (YAG) في مجموعة متنوعة من البصريات كعملية المحاكاة للألماس والأحجار الكريمة **[11].**
- خصائص هذا الأخير (YAG) يجعله مادة ممتازة للأنظمة الليزرية عالية الطاقة وذات الاستطاعة الكبيرة.
- عقيق الألمنيوم والإيتريوم النقي لا يمكن استخدامه كوسيط ليزري لوحده، ولكن عند التطعيم بالأيون المناسب، يستخدم (YAG) بشكل فعال وشائع كمادة مضيفة في عديد ليزرات الحالة الصلبة، حيث يتم إنشاء أنظمة ليزر عالية الطاقة وعالية الكفاءة، عندما يتم التطعيم بأيونات الأتربة النادرة على سبيل المثال(النيوديميومNd، الأربيوم Er، السيريوم Ce...) فإنها تشكل وسطا فعالا نشطا يستخدم في مجموعة واسعة بدء ا من مضخات الليزرمنخفضة الطاقة إلى الأنظمة ذات الاستطاعات الليزرية الكبيرة.[11]
- الجمع بين الضغط الداخلي المخفض جدا والصلابة العالية والمقاومة العالية للحرارة يجعل من بلورة (YAG) بديلا مهما للياقوت الذي كان يستعمل في الماضي قبل استعمال YAG[11].

الشكل(II-6): عقيق الألمنيوم الايترنيوم(Yag ، $Y_3Al_5O_{12}$) [25].

II-7-6- النيوديميوم Nd:

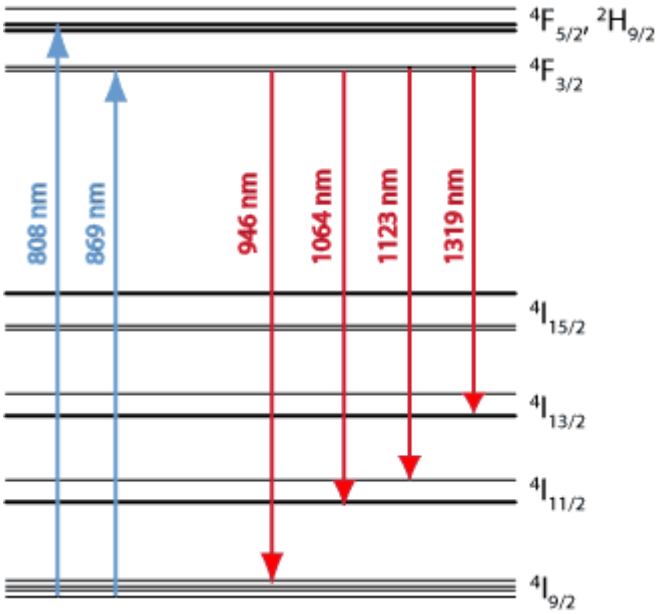
Nd هو العنصر الأول الذي استخدم في الليزر وهو الأكثر أهمية في هذه المجموعة (ذرات عناصر الأتربة النادرة)، نحصل على انبعاثات مشعة له عند القيام بالتطعيم مع مواد مضيفة مختلفة، فهو له القابلية على إنتاج أشعة في عدة مناطق مختلفة الطول الموجي وخاصة في المنطقة تحت الحمراء يقوم النيوديميوم بالضخ عند الطول الموجي 869nm وتصدر منه أطوال موجية عند 1300nm و1060 nm و946nm.[3].

تكون الانتقالات المشعة لـ Nd^{+3} كما يلي:

$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ $\lambda=1,31\mu m$ **(7-II)**

$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ $\lambda=1,06\mu m$ **(8-II)**

$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ $\lambda=0,94\mu m$ **(9-II)**



الشكل(II-7): مخطط يوضح مستويات الطاقة والانتقالات الإلكترونية لـ Nd. [3]

- إن نطاقي الضخ الرئيسيين يكونان بين المستويات $^4I_{9/2}$، $^4F_{5/2}$، $^4H_{9/2}$ عند الاطوال الموجية 869nm و808nm [13].
- مدة حياة المستويات $^4H_{9/2}$ و $^4F_{5/2}$ قصيرة جدا لذلك يحدث استرخاء للأيونات بسرعة نحو المستوى $^4F_{3/2}$ بانتقال غير مشع[13].

II-7-6-1-عقيق الألمنيوم الإيتريوم (YAG) المطعم بواسطة النيديوم (Nd:YAG):

النيوديميوم-ياغ (Nd:YAG) أوعقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بالنيوديميوم(Nd:YAG)، وسط فعال ممتاز يستخدم في ليزرات الحالة الصلبة حيث يتم استبدال جزء صغير جدا من أيونات الايتريوم Y^{+3} في بلورة (YAG) (1%) بالنيديميوم المتأين ثلاثيا Nd^{+3} ذي الخصائص الفزيائية المتشابهة (نفس الحجم الذري) [6]، عملية التطعيم هذه تسمح بتوفير الشروط اللازمة لحدوث الفعل الليزي داخل البلورة.

الجداول التالية توضح بعض الخصائص البصرية والفزيائية و الحرارية لـ Nd:YAG حيث:

Property	Units	300K	200K	100K
Thermal conductivity (الموصليّة الحراريّة)	W cm^{-1} K^{-1}	0.14	0.21	0.58
Specific heat (الحرارة النوعيّة)	W s g^{-1} K^{-1}	0.59	0.43	0.13
Thermal diffusivity (انتشاريّة حراريّة)	cm^2 s^{-1}	0.046	0.10	0 .92
Thermal expansion (التمدّد الحراري)	K^{-1} $\times 10^{-6}$	7.5	5.8	4.25
$\partial n/\partial T$	K^{-1}	7.3 $\times 10^{-6}$	—	—

الجدول(II-3): جدول الخصائص الحرارية لـ (Nd:YAG).[10]

Chemical formula	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$
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 (قرينة الانكسار)	1.82 (at 1064nm)
Modulus of elasticity (معامل المرونة)	3 $\times 10^3$ kg/cm^3
Photon energy (طاقة الفوتون) at 1060 nm	1.8610
Nd atoms/cm^3 (^{3}ذرّات النيوديميوم/سم)	1.83 $\times 10^{20}$
Fluorescence lifetime (عمر الإستِشْعاع أو الفَوْرة)	230 µs
Line width (عرض الشعاع الطيفي)	120 GHz
Rupture stress (إجهاد التمزّق)	1.3 - 2.6 $\times 10^3$ kg/cm^3
Tensile strength (مقاومة الشّد)	200 MPa
Poisson ratio (نسبة بواسون)	0.3
Scatter losses (الضّياع الناتج عن التّشتت)	0.002 cm^{-1}
Stimulated emission cross section (مساحة مقطع الانبعاث المحفز)	
$R_2 - Y_3$	σ_{21}= 6.5 $\times 10^{-19}$ cm^2
$^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$	σ_{21}= 2.6 $\times 10^{-19}$ cm^2
Thermal expansion coefficient (معامل التمدّد الحراري)	
orientation (توجيه)	8.2 $\times 10^{-6}$ $°C^{-1}$, 0-250 °C
orientation (توجيه)	7.7 $\times 10^{-6}$ $°C^{-1}$, 10-250 °C
orientation (توجيه)	7.8$\times 10^{-6}$ $°C^{-1}$, 0-250 °C
Thermal conductivity (الموصليّة الحراريّة)	14 W/m.K
Fracture strength (مقاومة الكسر)	180-210 N/mm^2

الجدول(II-4): جدول الخصائص الفزيائية والبصرية لـ (Nd:YAG) [23].

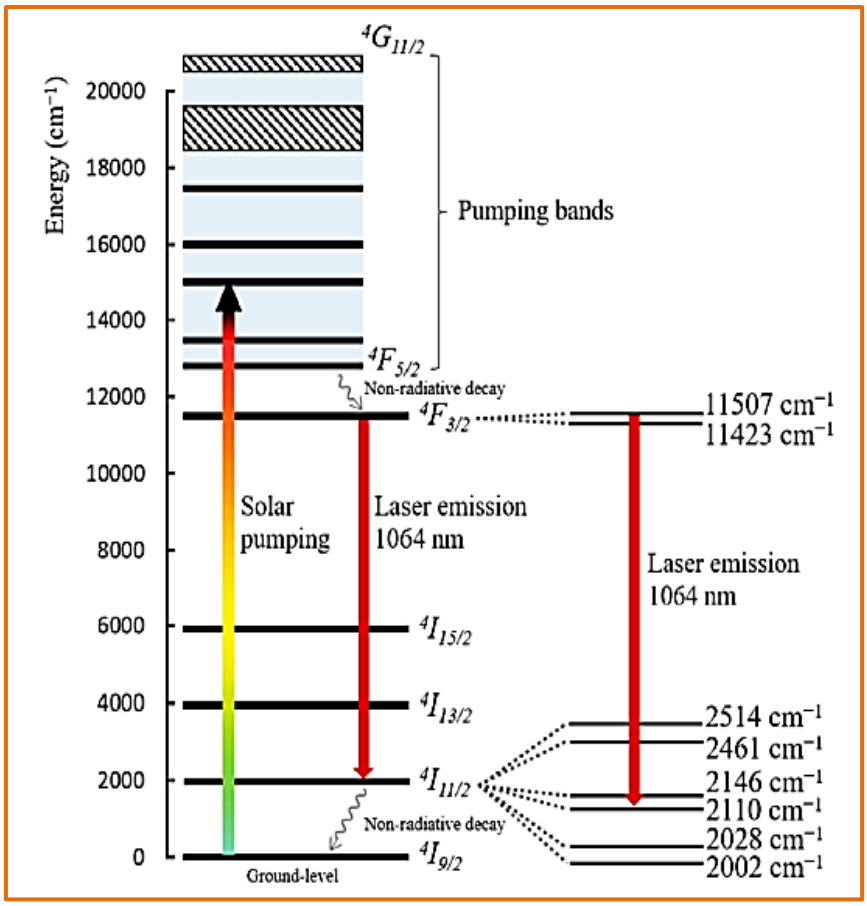
تم عرض عملية الليزرNd:YAGلأول مرة من طرف Geusic وزملائه في Bell Laboratories عام 1964[15].

II-7-6-2- ليزرعقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بواسطة ذرات النيوديوم(Nd:YAG):

- ليزر النيوديوم - ياغ يعد من أكثر الليزرات الحالة الصلبة استعمالا ويكون وسطه الفعال عبارة عن بلورة عقيق الألمنيوم الايتريوم (Y3Al5O12) تسمى اختصارا (YAG) وهو مطعم بشوارد Nd^{+3} بنسبة لا تتجاوز1.5%[5].
- ليزر (Nd:YAG)هو نظام رباعي السوية ما عدا عند الطول الموجي 946nm فانه نظام ذو ثلاث سويات ومنه فان الانقلاب السكاني يحدث فيه بسهولة أكثر من نظام ذي ثلاث سويات، المستوي السفلي لليزرهنا أعلى بكثيرمن الحالة الأرضية وهذا ما يتسبب في عملية إخلائه بسرعة ، وهذا يؤدي الى تجنب إعادة الامتصاص.أي امكانية الوصول إلى قدرة الضخ عند العتبة المنخفضة مما يسهل الحصول على الانبعاث المحفز، أطوال موجات انبعاث الليزر (Nd:YAG) هي:1319nm،946nm،1064nm،1123nm [23].

- تتحقق أكبرقيمة للكسب الليزري في ليزرالنيوديميوم عند الانبعاث الليزي القوي والأكثراستعمالا الذي طول موجته $\lambda=1.064\mu m$ [2] حيث يعد هذا الخط الاكثر مردودا ليزريا.
- عند $\lambda=0.960\mu m$ يعمل ليزر (Nd:YAG) كنظام شبه ثلاثي المستويات بكثافة ضخ أعلى من الأنظمة ذات أربع مستويات.
- عند الانبعاث اليزري ذي الخط $\lambda=1.123\mu m$ من الصعب للغاية إتمام العملية الليزرية وذلك بسبب الانتقالات الجد ضعيفة [5].

مخطط مستويات والانتقالات الطاقوية للوسط (Nd:YAG):



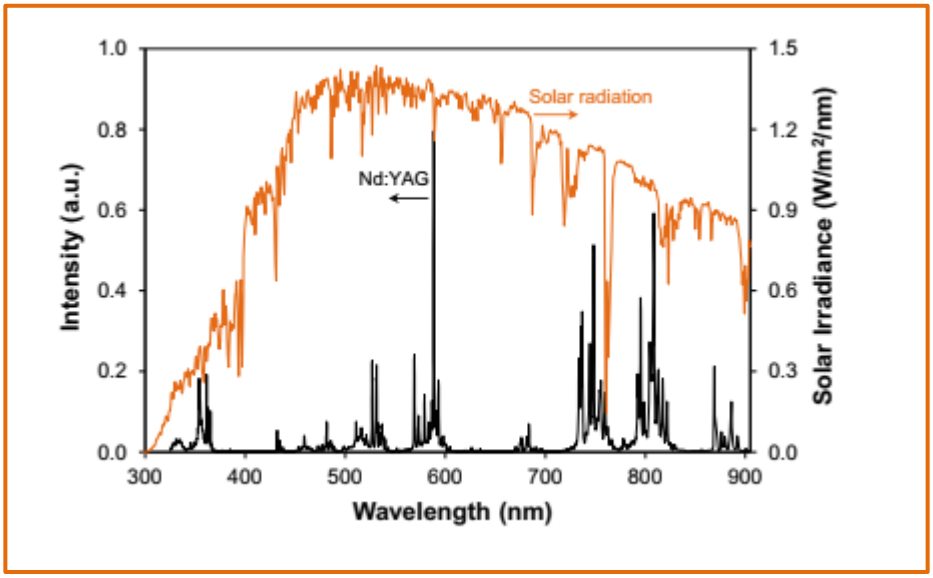
الشكل(II-8): مخطط مستويات الطاقة لـ Nd:YAG.

II- 7- 6-3- طيف امتصاص (Nd:YAG) ونسب التطابق مع طيف الانبعاث الشمسي :

يحوي طيف امتصاص بلورة النيوديوم - ياغ (Nd:YAG) 22 قمة امتصاص .

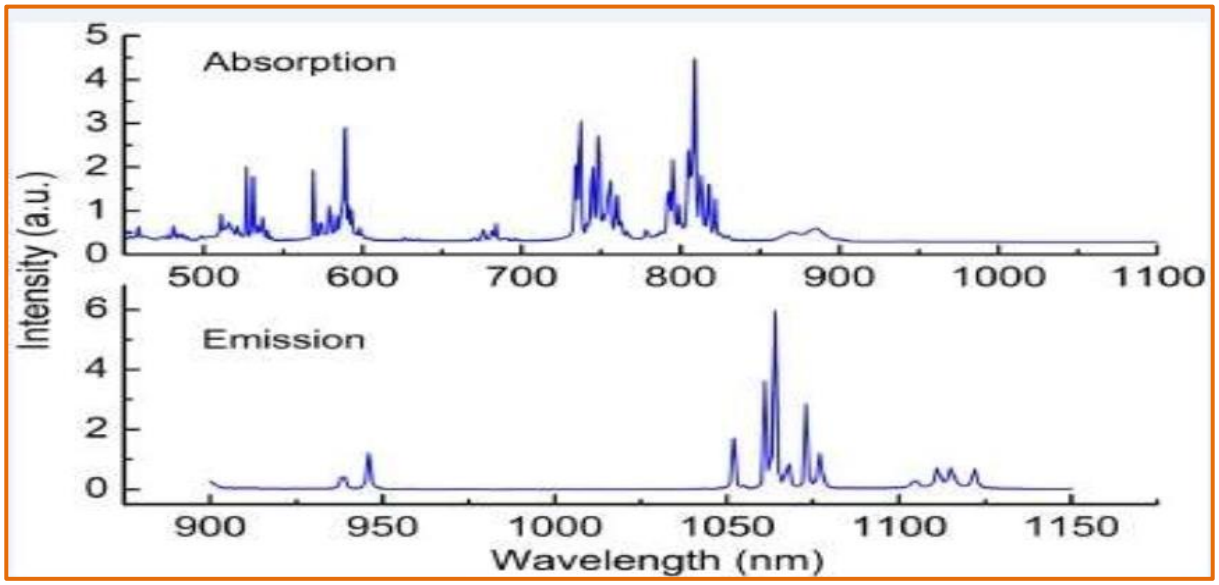
التطابق بين امتصاص (Nd:YAG) له نطاقات متعددة تطابق مع طيف الانبعاث الشمسي إلا أن نسبة التطابق تعد صغيرة حيث تساوي 16% من مجموع طيف طاقة الإشعاع الشمسي.

يمثل المخطط التالي نسبة التداخل والتطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص للوسط (Nd:YAG):



الشكل(II-9): تداخل طيف امتصاص للوسط (Nd:YAG) مع طيف الانبعاث الشمسي[6].

كما يمثل المخطط التالي طيف الامتصاص والإصدار للوسط الفعال (Nd:YAG):



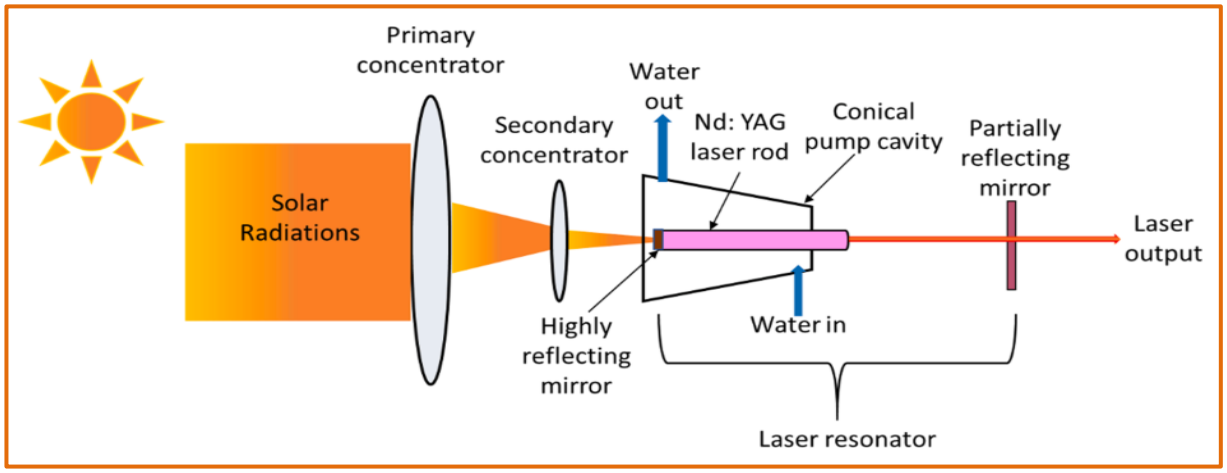
الشكل(II-10): طيف الامتصاص والانبعاث لـ (Nd:YAG)[22].

إن الخصائص الفزيائية والكميائية للوسط الليزري (Nd:YAG) من تحمل للضخ عالي الكثافة و توصيله الحراري الممتاز وكفاءته الكمية العالية وصلابته ضد الكسر [2] تجعل منه من بين أفضل الأوساط الفعالة استخداما رغم نسبة التداخل الضعيفة نسبيا بين طيف امتصاصه و طيف الانبعاث اللاشعاع الشمسي الصادر حيث بلغة قيمة ونسبة التداخل بينهما ما قيمته % 16 من مجموع طيف الاشعاع الشمسي [16].

إن ليزرات (Nd:YAG) يمكنها أن تعمل بنظام الموجة المستمرة continuous wave (cw) أو بالنظام النبضي pulsed وذلك باستخدام مصابيح خطية في كلا الحالتين .

II-7-6-4- مكونات وتركيبة ليزر(Nd:YAG):

تتكون منظومة ليزر Nd:YAG من ثلاث عناصرأساسية هي علي التوالي: الوسط الليزي الفعال، المرنان، مصدر الطاقة او الضخ الخارجي، كما يبين الشكل التالي مخططا لمنظومة الليزر الشمسي Nd :YAG .



الشكل(II-11): رسم تخطيطي لليزر Nd:YAG يعمل بالطاقة الشمسية [23].

- **الوسط الفعال:** قضيب الNd: YAG، ويوضع في مركزالتجويف البصري، أي الجزء الأوسط من الهيكل، ويمثل العنصر الأساسي من ضمن مكونات الليزر الشمسي، عند تعرضه للإشعاع الشمسي المركز تنتقل الإكترونات داخله من حالات الطاقة المنخفضة إلى المرتفعة مما يسمح بحدوث الفعل الليزري.
- **المرنان:** ويتم الحصول عليه عن طريق طلاء أطراف قضيب Nd: YAG بالفضة، حيث يطلى أحد الاطراف بالكامل وذلك من أجل تحقيق أقصى انعكاس ممكن للضوء بينما يتم طلاء الطرف الاخر جزئيا .
- **مصدر الطاقة(الضخ):**في حالة الليزر الشمسي، تمثل أشعة الشمس المصدر الأساسي للطاقة المركزة والمضخة في الوسط الفعال ، تساهم هده الطاقة في الحصول على الانتقالات الإلكترونية في المستويات الداخلية لمادة الوسط الفعال.

لتحسين كفاءة الليزر حتى يصبح قادرا على متصاص مجالات أكبر ضمن طيف ضوء الشمس يجب أن يطعم (Nd:YAG) بعناصر أخرى أي القيام بعملية التطعيم المظاعف ومن أبرز هذه العناصر أيون الكروم الثلاثي التاين (Cr^{+3}) الذي سوف يوفر له نطاق امتصاص أكبر داخل المجال الطيفي .

II-7-7- التطعيم المضاعف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم بكل من النيوديميوم والكروم (Cr:Nd:YAG):

الغرض من التطعيم المضاعف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم (YAG) بكل من أيونات النيوديميوم الثلاثية Nd^{+3} و ايونات الكروم الثلاثية Cr^{+3} هو تحسين مردود الليزر الشمسي و الحصول على أوساط ليزرية فعالة ذات كفاءة أفضل وذلك من خلال توفير نطاقات امتصاص أوسع لطيف الاشعاع الشمسي

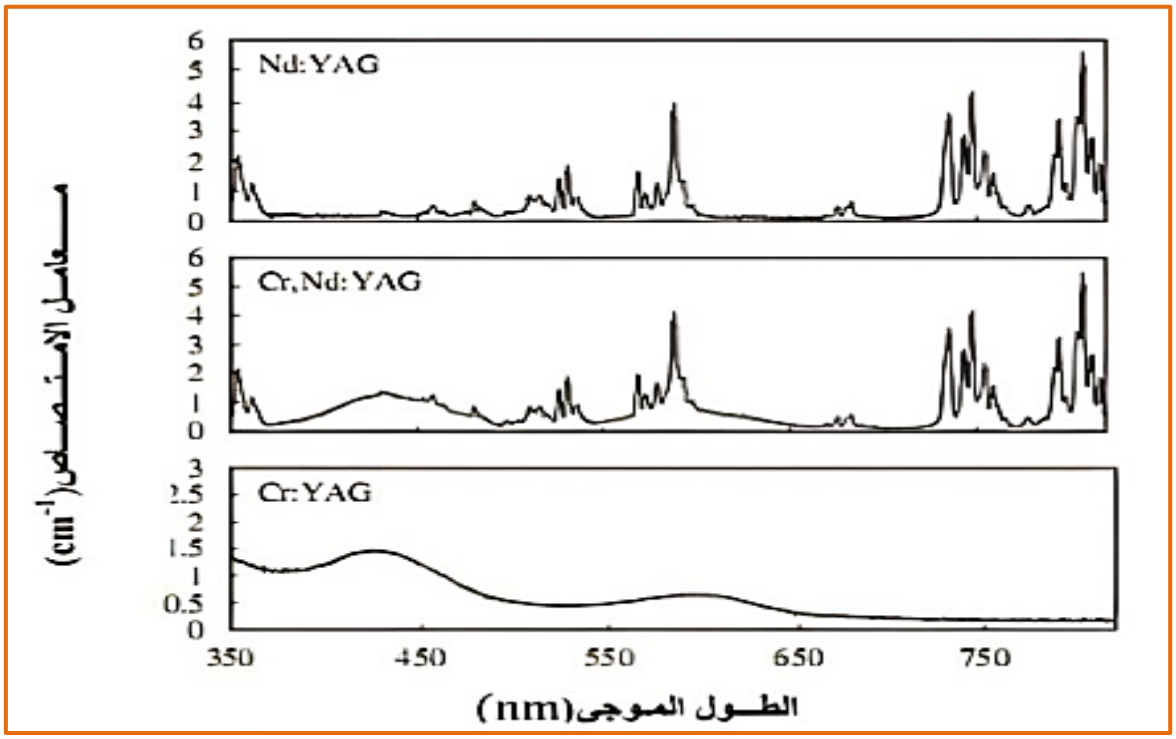
عريض النطاق وتحسين نسبة التداخل والتطابق بين نطاقات الامتصاص للوسط الفعال ونطاقات الانبعاث الشمسي.

عادة ما تكون نسب التطعيم في الوسط كالتالي :(نسبة التطعيم Cr %0.1 ، Nd%1) للوسط (Cr:Nd:YAG)

II-7-8- عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذوالتطعيم المضاعف بالنيوديميوم والكروم (Cr:Nd:YAG):

النيوديميوم- كروم- ياغ مضاعف التطعيم أوعقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم والكروم (Cr:Nd:YAG)،أوما تسمي بمادة السيراميك، وهي عبارة عن وسط فعال ليزري يشبه إلى حد كبير الوسط (Nd:YAG) حيث تعمل أيونات الكروم المضافة Cr^{+3}على زيادة كفاءة ليزر (Cr:Nd:YAG) وذلك لأن لها مجال امتصاص كبيرنسبيا متوافق مع طيف الانبعاث الشمسي خاصة في نطاق الضوء المرئي الذي تتركز فيه جل طاقة الاشعاع الشمسي. تم إثبات أن امتصاص أيون الكرومCr^{+3} أقوى بكثير من امتصاص أيون النيوديومNd^{+3} في هذا المجال (LV) وكذلك تداخل انبعاث أيون الكروم Cr^{+3} مع مجال امتصاص Nd^{+3}، مما أدى إلى الزيادة المعتبرة في كفاءة ليزر (Cr:Nd:YAG).

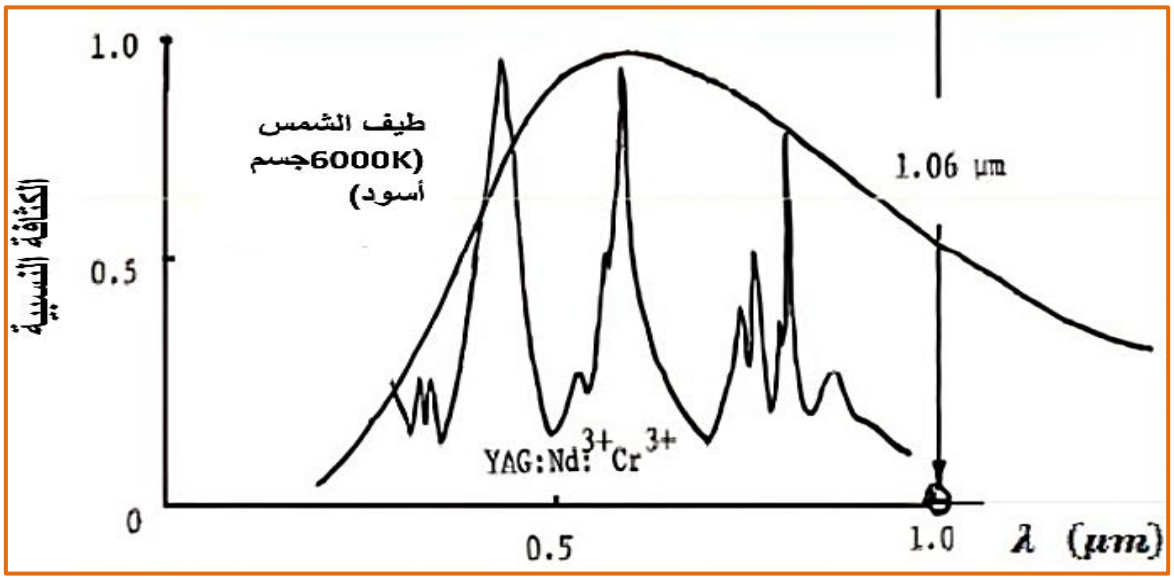
تم قياس طيف الامتصاص عند درجة حرارة الغرفة للأوساط التالية (Cr:Nd:YAG) و (Nd:YAG) و (Cr:YAG) وبنسب التطعيم المذكورة (1%لـ Ndو0.1%لـ Cr) فوجد أنه لكل من الوسطين (Cr:Nd:YAG) و(Cr:YAG) توجد قمم امتصاص واسعة حول600nm,440nm كما يوضحه المخطط التالي [17]:



الشكل(II-12): طيف الامتصاص للأوساط (Nd:YAG) (Cr:Nd:YAG) (Cr:YAG) [3].

II-7-9- التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف امتصاص لـ (Cr:Nd:YAG):

تتركزمعظم طاقة الاشعاع الشمسي في المجال المرئي (LV) في هذا المجال، أيونات الكروم Cr^{+3} المضافة تبرزخصائص امتصاص ممتازة وواسعة داخل هذا النطاق مع شدة امتصاص جد قوية، كذلك تداخل مجال انبعاث أيونات الكروم مع مجال امتصاص أيونات النيوديوم، كل هذه الخصائص تؤدي إلى رفع نسبة التطابق بين طيف الاشعاع الشمسي الصادر وطيف الامتصاص للوسط (Cr:Nd:YAG) حيث بلغت نسبة التطابق 24 % [23].



الشكل(II-13): تطابق طيف الانبعاث الاشعاع الشمسي مع طيف امتصاص (Cr:Nd:YAG)[3].

II-7-10- آلية نقل الطاقة الممتصة من أيونات الكروم Cr^{+3} إلى أيونات النيوديميوم Nd^{+3}:

عند تسليط الإشعاع الشمسي المركزعلى الوسط (Cr:Nd:YAG)وبالتحديد أيونات الكروم الثلاثي Cr^{+3}، تتحفز إلكتروناته وتنتقل من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة حسب المخطط التالي:

$^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$

$^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$

ثم بعدها تنتقل إلى حالة التراخي (مستوي2E) للكروم Cr^{+3} وبعدها يتم نقل الالكترونات على طريقتين:

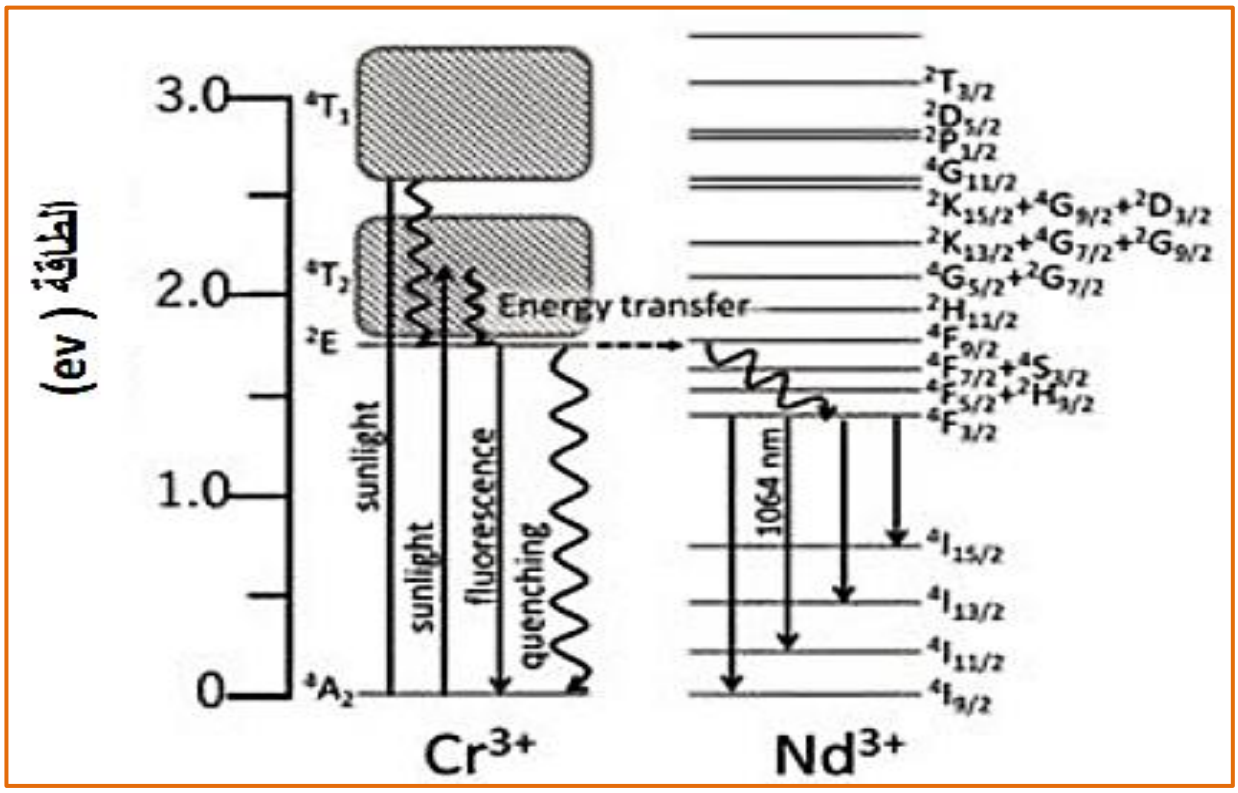
- **الانتقال الاشعاعي:**

جزء من أيونات Cr^{+3} الموجودة في الحالة المثارة E2 تنتقل مباشرة إلى الحالة الأرضية محررة طاقة hv لأيونات Cr^{+3} مصحوبة بانبعاث في حدود 600 nm – 800.

- **الانتقال غيرالاشعاعي:**

تنتقل الاكترونات المتبقية لأيونات الكروم إلى المستويات العليا للنيوديوم Nd^{+3} من الحالة E2 إلى الحالة $^4F_{3/2}$(انتقالات غير مشعة) هذا يؤدي إلى تحسين وزيادة معتبرة في كفاءة الليزركما يقلل من قوة تذبذب عتبته، حيث تنتقل مجموع الالكترونات في النهاية من $^4F_{3/2}$ الى $^4I_{11/2}$محررة طاقة hv بطول موجي مناسب 1046nmوبالتالي زيادة فعالة في المردود الليزري .

مخطط نقل الطاقة من أيونات الكروم Cr^{+3} الى أيونات النيوديميوم Nd^{+3} :



الشكل(II-14): مخطط نقل الطاقة من أيونات الكروم Cr^{+3} الى أيونات النيوديوم Nd^{+3} [23].

II-7-11- التطعيم المضاعف لعقيق الإيتريوم والألمنيوم بكل من النيوديميوم والسيريوم (Ce:Nd:YAG):

يعدالتطعيم المضاعف لأيونات Cr^{+3} في بلورة (Ce:Nd:YAG) طريقة واعدة لتعزيز كفاءة الليزر الذي يعمل بالطاقة الشمسية، والحصول على أوساط ليزرية فعالة ذات كفاءة أفضل وذلك من خلال توفير نطاقات امتصاص أوسع لطيف الاشعاع الشمسي عريض النطاق وتحسين نسبة التداخل والتطابق بين نطاقات الامتصاص للوسط الفعال (Ce:Nd:YAG) ونطاقات الانبعاث الشمسي.

منذ 1969تم بذل جهود متواصلة في التطعيم المضاعف لبلورة Nd:YAG بعنصر Ce^{+3} حيث درس "Mares" وزملاؤه آلية نقل الطاقة بين Nd^{+3} و Cr^{+3} عند درجة حرارة منخفضة.

عادة ما تكون نسب التطعيم في الوسط كالتالي :(نسبة التطعيم Ce %0. 5 ، Nd%1) للوسط (Ce:Nd:YAG) [6].

II-7-12-عقيق الألمنيوم والايتريوم ذوالتطعيم المضاعف بـ Nd^{+3} وCe^{+3}:

بلورة (Ce:Nd:YAG) أوعقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم والسيريوم (Ce:Nd:YAG)هي وسط نشط له إمكانية زيادة كفاءة أشعة الليزرذات النطاق العريض مقارنة ببلورة (Nd:YAG) بسبب امتصاصه القوي للأشعة فوق البنفسجية (UV) والمناطق الطيفية المرئية وذلك بفضل نطاقات الامتصاص القوية لأيونات للسيريوم Ce^{+3} في هذا المجال.

عند ضخ الضوء عريض النطاق تنتقل الطاقة بكفاءة من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديميومNd^{+3} ، مما يؤدي إلى الزيادة في كفاءة الضخ الليزري وبالتالي حمل حراري أقل وإنتاج طاقة أعلى من الوسط الأول(Nd:YAG) وذلك عند نفس مستوى الضخ الاساسي.

تتمتع هذه المادة (Ce:Nd:YAG) بمقاومة جيدة للضرر الذي تسببه الأشعة فوق البنفسجية من مصدر الضخ، وعتبة منخفظة لليزر[24].

II-7-13- خصائص بلورة (Ce:Nd:YAG):

- عتبة ضخ منخفضة .
- كفاءة ليزرية عالية .
- استقرار حراري جيد .
- جودة بصرية عالية .
- خاصية جيدة مضادة للاشعاع البنفسجي .

كما يوضح الجدول التالي أهم الخصائص الفزيائية والكميائية والحرارية لـ (Ce:Nd:YAG):

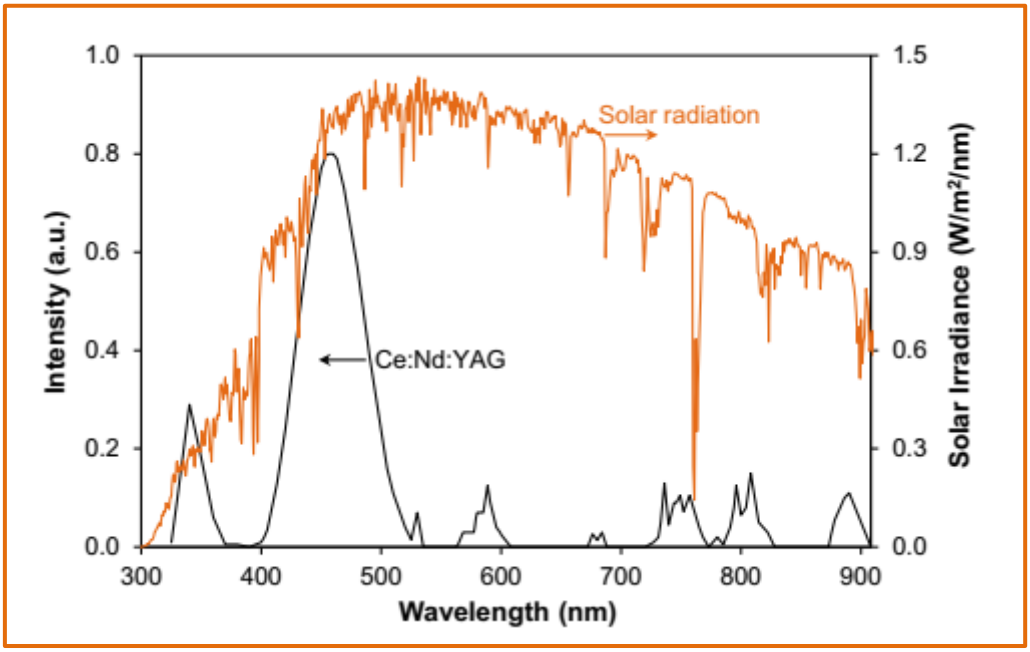
الجدول(II-5): أهم الخصائص الفزيائية والكميائية والحرارية لـ (Ce:Nd:YAG)[24].

Chemical formula	**$Ce^{3+}:Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$**
Dopant concentration (تركيز عناصر التّطعيم)	Nd: 1.1 - 1.4 atm % Ce 0.05 - 0.1 atm %
Crystal structure (البُنية البلوريّة)	Cubic (بُنية مكعّبة الشكل)
Lattice parameters (ثابت الشبكة البلوريّة)	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 النوعيّة)	0.59 J/g.cm^3
Modulus of elasticity (معامل المرونة)	310 GPa
Young's modulus (معامل المرونة الطولي لـ'يونغ)	3.17×104 Kg/mm^2
Poisson ratio (نسبة بواسون)	0.3(est.)
Tensile strength (مقاومة الشّد)	0.13~0.26 GPa
Thermal expansion coefficient (معامل التمدّد 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 (الموصليّة الحراريّة)	14 W m^{-1} K^{-1} (@25 °C)
Thermal optical coefficient ($\partial n/\partial T$)	7.3×10^{-6} °C^{-1}
Thermal shock resistance (مقاومة الصّدمات الحراريّة)	790 W/m
Laser transition (انتقال الليزر)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$
Laser wavelength (الطول الموجي لليزر)	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 الإستِشْعاع أو الفلْورة)	230 μs
Index of refraction (قرينة الانكسار)	1.8197@1064nm

II-7-14- التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي و طيف امتصاص (Ce:Nd:YAG):

تؤدي الخصائص الممتازة التي توفرها أيونات السيريوم في الوسط الفعال (Ce:Nd:YAG) من نقل للطاقة المكتسبة بكفاءة منها نحوأيونات النيوديومNd^{+3} وامتصاص قوي في المنطقة فوق البنفسجية و المرئية وبالتالي الاستغلال الأفضل لطيف الشمس ، وكذلك تداخل مجال انبعاث أيونات السيريوم مع مجال امتصاص أيونات النيوديوم، كل هذا يسمح برفع نسبة التطابق بين طيف الاشعاع الشمسي الصادر وطيف الامتصاص للوسط (Ce:Nd:YAG) حيث بلغة نسبة التطابق 32% [6].

الشكل التالي يبين التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف امتصاص Ce:Nd:YAG



الشكل(II-15): التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف امتصاصCe:Nd:YAG [6].

II-15-7- نقل الطاقة الممتصة من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديميوم Nd^{+3}:

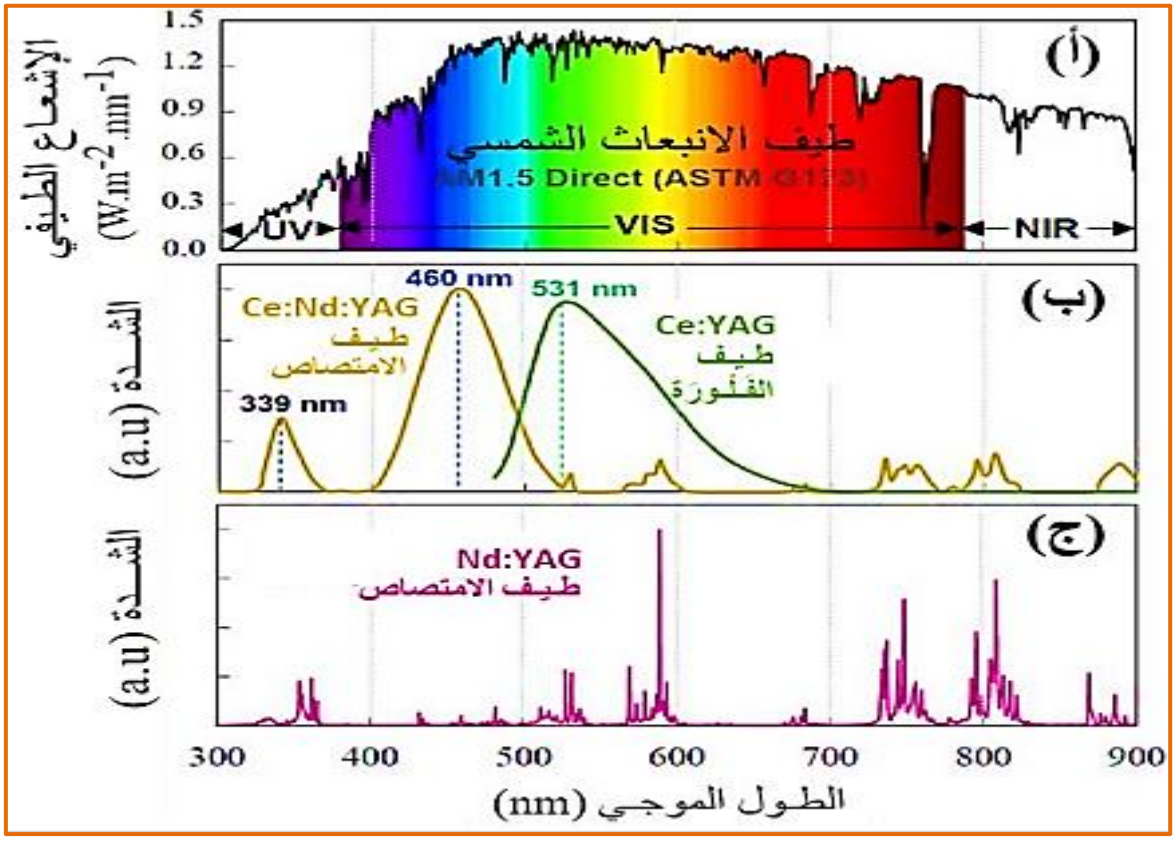
تمت دراسة آليات نقل الطاقة في بلورة (Ce:Nd:YAG) في العديد من الدراسات حيث تم إثبات نقل الطاقة بين أيونات Ce^{+3} وNd^{+} من خلال تراكب وتداخل نطاقات الانبعاث والامتصاص بين الأيونين.

سنة 2015 قام "Tai" وزملاؤه بنشر آلية تعتمد على نقل الطاقة من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديومNd^{+3} في بلورة (YAG) حيث أشارت النتائج الى تعزيزالانبعاثات عند الخط ذي الطول الموجي 1064nm وبناء عليه تم التطعيم المضاعف لوسط الليزر Nd:YAG مع Ce^{+3} بحيث يمكن لأيونات Ce^{+3} تحسين كفاءة الليزر بشكل كبيروهذا راجع لأن أيون Ce^{+3} يملك نطاقا واسعا وله نطاقات امتصاص قوية في المناطق المرئية وفوق البنفسجية وله نطاقات أخرى إضافية حمراء وقريبة من تحت الحمراء متوافقة مع طيف الامتصاص للنيوديومNd^{+3} في بلورة YAG[24] .

يحتوي طيف الامتصاص لـ (Ce:Nd:YAG)على نطاقي امتصاص عريضين يتمركزان عند القمم 339nm و 460nm وهما من مميزات أيون Ce^{+3} في شبكة بلورة YAG، ينتج عن هذه الامتصاصات طيف فلورة ووميض بتألق أخضر قوي وواسع يتمركزحول القمة 531nm مما يجعله يتداخل بشكل جيد مع ذروتي الامتصاص لأيونات النيوديومNd^{+3} حول 531nm و 589nm ومما يسمح بعملية نقل الطاقة من أيونات السيريوم إلى أيونات النيوديوم المسؤول الرئيسي عن الفعل الليزري.

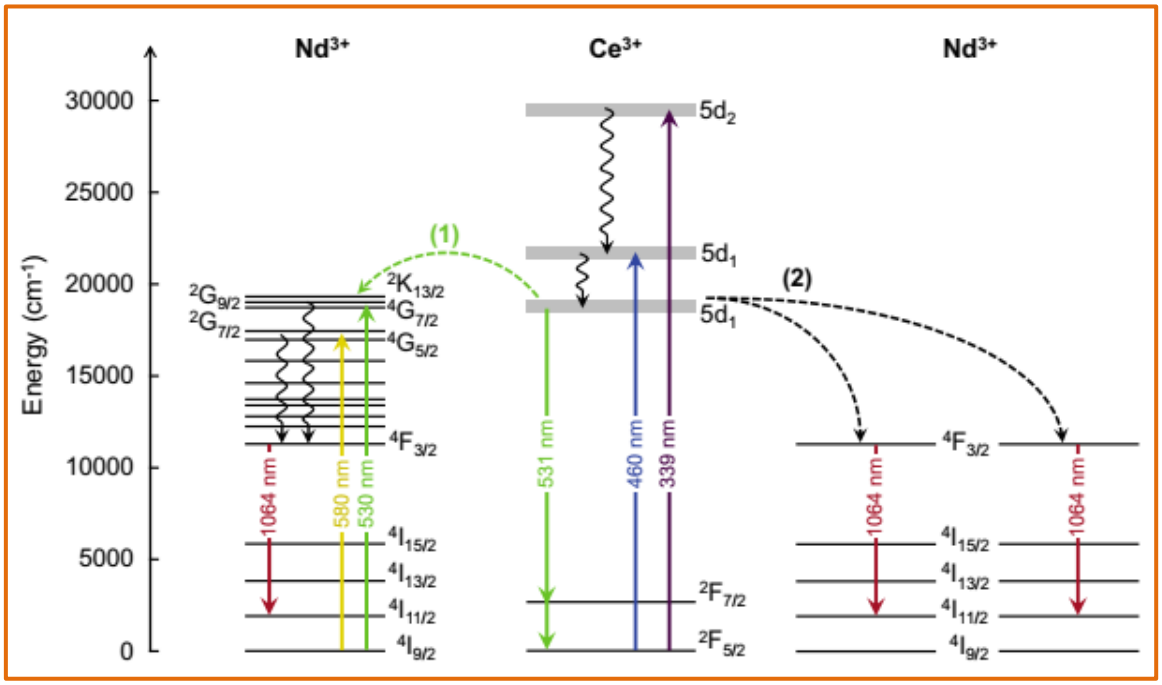
كما بينت أبحاث العالم Tai ورفاقه وجود إمكانية أخرى لنقل الطاقة وذلك عن طريق القطع الكمي (cutting quantum) للأشعة تحت الحمراء القريبة NIR الذي يتضمن التحويل التنازلي (down conversion-) للفوتون المرئي الممتص إلى انبعاث فوتونين اثنين من الأشعة تحت الحمراء[24].

المخطط التالي يظهر طيف الامتصاص لـ (Ce:Nd:YAG)، طيف الامتصاص لـ (Nd:YAG)، طيف الفلورة لـ (Ce:YAG)، طيف الانبعاث للاشعاع الشمسي:



الشكل(II-16): طيف الامتصاص لـ (Ce:Nd:YAG)، طيف الامتصاص لـ (Nd:YAG)، طيف الفلورة لـ (Ce:YAG)، طيف الانبعاث للإشعاع الشمسي[20].

كما يوضح المخطط التالي رسم تخطيطي لآلية نقل الطاقة الممتصة من أيونات الكروم Ce^{+3} إلى أيونات Nd^{+3} داخل الوسط الفعال (Ce:Nd:YAG):



الشكل(II-17): مخطط نقل الطاقة في الوسط الفعال Ce:Nd:YAG [6].

عندما تمتص أيونات الكروم الفوتونات المضخة تحت الاطوال الموجية التالية 339nm, 460nm تتحفز إلكتروناتها من الحالة الأرضية $^2F_{5/2}$ وتنتقل إلى نطاقي المضخة العريضي $^5d_2$ و $^5d_1$ على التوالي ، يمكن للإلكترونات الموجودة في نطاق المضخة $^5d_2$(2B1g) أن تسترخي بشكل غير إشعاعي إلى نطاق المضخة السفلي $^5d_1$(2A1g) ثم تنتقل إلى الحالة الأرضية $^2F_{5/2}$ مع إصدار إشعاعات (فوتونات) بطول موجي 531nm، هذه القيمة (531nm) تتناسب وتتداخل مع الانتقال الاشعاعي I→ G في أيون Nd^{3+} وبالتالي تحدث آلية النقل الاشعاعي، تسمي هذه العملية بعملية الاسترخاء المتبادل ويشار اليها بالمسار واحد في المخطط أي مسار نقل الطاقة الاشعاعي عبر الاسترخاء المتقطع .

Radiative energy transfer pathway through crosse-relaxation

آلية نقل الطاقة الثانية قائمة على التحويل التنازلي التعاوني أي :

(cooperative –down conversion)

وهي ممكنة لان طاقة الانتقال $^5d_1 \rightarrow ^2F_{5/2}$ لأيون السيريوم Ce^{3+} هي تقريبا ضعف فرق الطاقة بين المستووين لأيون Nd^{+3}، كما يوضحه المسار 2 في المخطط أي مسار التحويل التنازلي للقطاع الكمي .

Quantum cutting down- conversion pathway

II-8- دراسة نظرية للوسط الفعال(Ce :Cr: Nd: YAG)،عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بكل من أيونات النيوديميوم والسيريوم والكروم:

II-8-1- التطعيم المضاعف للوسط (Nd:YAG) بكل من أيونات السيريوم والكروم:

عند القيام بعملية التطعيم المضاعف للوسط (Nd:YAG) بكل من أيونات الكروم Cr^{3+} والسريوم Ce^{+3} فنلاحظ أن هناك زيادة معتبرة في كفاءة الانبعاث الليزري وهذا يدل على وجود انتقال للطاقة بين الأيونات المحسسة Cr^{+3} و Ce^{+3} إلى الأيونات المنشطة Nd^{+3}.

تتم عملية التطعيم وذلك باستبدال أيونات الكروم ذات نصف القطر الأيوني R= 0.62 A مع أيونات الألمنيوم ذات نصف القطر الأيوني R= 0.53A.

كما يحل أيون السيريوم ذو نصف القطر الايوني R=0.188A محل الايتريوم R= 0.106A وذلك بسبب تقارب أنصاف اقطارها الأيونية الأقرب نسبيا إلى بعض.

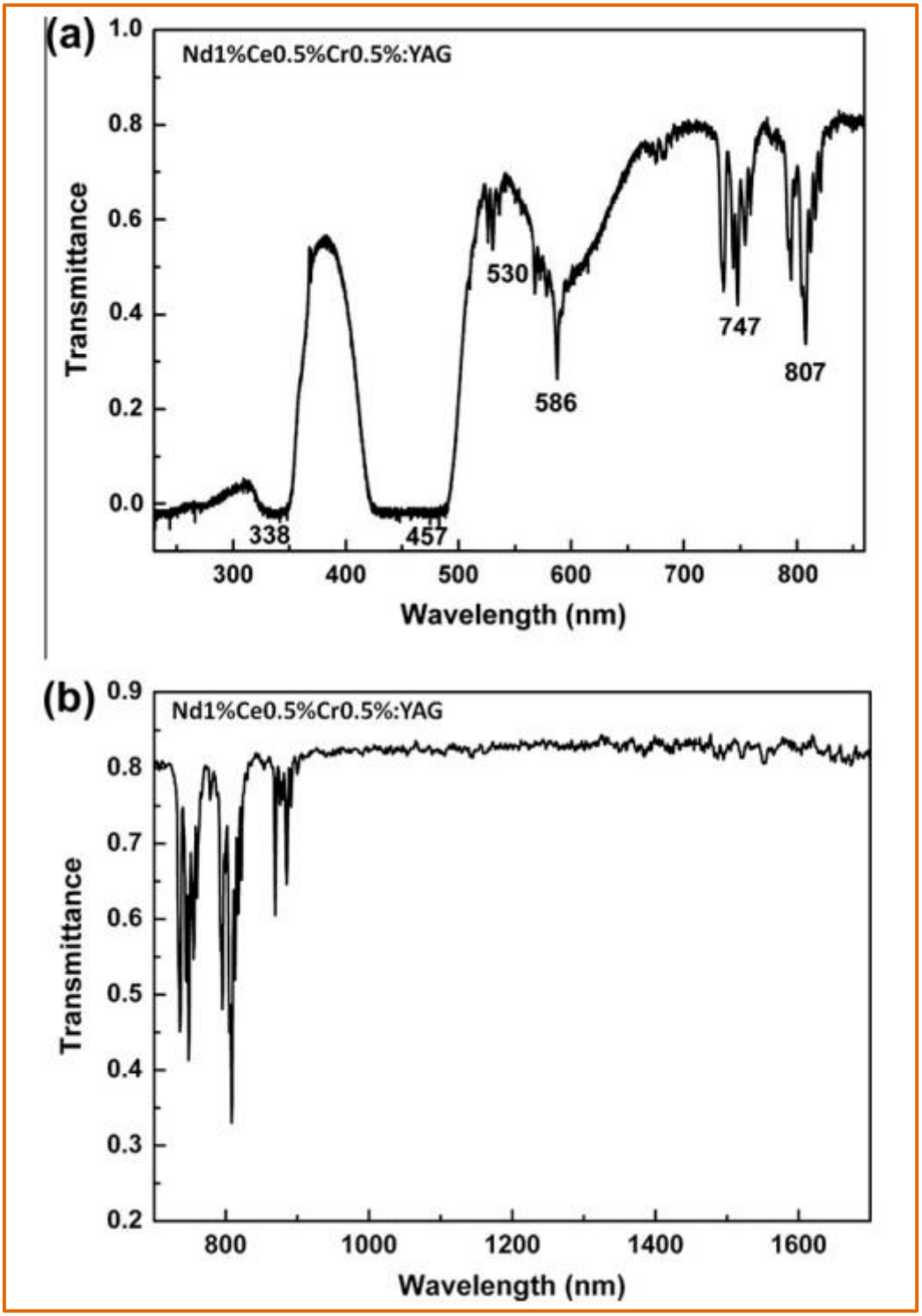
عادة ما تكون نسبة التطعيم في الوسط (Cr:Ce:Nd:YAG) في حدود: Nd^{+3}=1%، Ce^{+3}=0.5% (Cr^{+3}=0.5%). عدم التطابق في أنصاف أقطار الذرية للأيونات المطعمة والأيونات المضيفة و التركيز العالي للأيونات المطعمة يؤدي إلى تشويه محلي عال وتدهور جودة الليزر للبلورة، ويتم تجنب كل هذا عن طريق تقنية الليزر الخزفي والتي تتميز بإمكانية التطعيم بشكل كبير وأكثر تجانس [22].

II-2-8-عقيق الإيتريوم والألمنيوم المطعم بكل من أيونات النيوديميوم والسيريوم والكروم (Ce: Cr: Nd :YAG):

عقيق الايتريوم و الألمنيوم المطعم بكل من أيونات النيوديميوم، السيريوم و الكروم أو ما يسمى بالوسط الفعال الليزري الخزفي (Ce: Cr: Nd: YAG) ، وهو عبارة عن مادة ليزرية ممتازة ، بنطاقات امتصاص كبيرة وكفاءة ليزرية عالية نتيجة عمليات التطعيم المتكررة ، حيث يسمح التطعيم بأيونات النيوديوم في بلورة YAG بحدوث الفعل الليزري وإنتاج ليزر بطول موجي 1064 nm كما تسمح إضافة أيونات السيريوم Ce^{+3} و الكروم Cr^{+3} بزيادة نطاق الامتصاص لطيف الاشعاع الشمسي وتحسين نسبة التداخل والتطابق بينهما، وذلك بدون تغيير في مواقع الذروات لطيف الانبعاث للوسط المطعم .

تعمل الأيونات المحسسة المظافة Cr^{+3}،Ce^{3+} على امتصاص مجالات جديدة من طيف الاشعاع الشمسي وتسخيرها في عملية الإنتاج الليزري عن طريق نقل هذه الطاقة إلى أيونات النيوديميوم بطرق مختلفة داخل الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG).

يوضح المخطط التالي تجربة تم فيها تحفيز وسط من السيراميك الشفاف من Ce:Cr:Nd:YAG بنسب التطعيم التالية Nd=1%Ce=0.5% Cr=0.5% بواسطة تقنية الليزر الخزفي المتقدمة وبمساعدة البلورات النانوية:



الشكل(II-18): مخطط طيف النفاذية للسيراميك الشفاف Ce:Cr: Nd: YAG بسمك 1 mm [21].

❖ النتائج:

يوجد نطاق امتصاص واسع جدا عند حوالي 450nm مع وجود ذروة إضافية بالقرب من340 nm تتوافق قمم الامتصاص هذه مع تحولات الامتصاص لأيونات Ce^{3+} من حالتها الأرضية4F المدارات إلى مستويات مختلفة .

يتم إخفاء ذروة الامتصاص المتعلقة بأيونات الكروم Cr^{3+} عند 456nm داخل نطاق الامتصاص العريض لـ Ce^{3+} أما قمم الامتصاص الأخرى المركزة عند 530 nm 586 nm 747 nm 807 nm فتنتمي إلى الانتقالات الامتصاص لـ Nd^{+3} وانتقاله من المستوي الارضي I ، أيون الكروم أيضا له احتمال الامتصاص عند 599 مما يؤدي الى توسيع ذروة الامتصاص عند 586nm .

II-8-3- التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص للوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG):

في الوسط الفعال كانت نسبة التداخل بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص لهذا الوسط حوالي 16% من مجموع طيف طاقة للاشعاع الشمسي المنبعث.

تم تحسين هذه النسبة عند القيام بعملية التطعيم بواسطة أيونات الكروم الثلاثي Cr^{3+} للوسط الاول (Nd:YAG) حيث ازداد نطاق الامتصاص لطيف الاشعاع الشمسي للوسط الفعال المطعم (Cr:Nd:YAG) وارتفعت نسبة التداخل بينهما لتصل إلى حوالي 24 % أي بزيادة تحسين قدرها 8 % مقارنة مع الوسط الاول.

عند القيام بعملية التطعيم بأيونات السيريوم الثلاثية Ce^{+3} للوسط الفعال (Nd:YAG)، لوحظ ارتفاع في نسبة التطابق والتداخل بين نطاق الامتصاص للوسط الفعال المطعم (Ce:Nd:YAG)وطيف الإشعاع الشمسي المنبعث ، حيث بلغت نسبة التطابق ما قيمته 32% من مجموع طيف الاشعاع الشمسي أي بتحسين قدره 16%عن الوسط الأول في نسب التطابق.

II-8-4- الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG):

آلية نقل الطاقة المتقطعة تسمح بنقل الطاقة من أيونات الكروم(3D)Cr نحو أيونات النيوديوم(4F)Nd وبالتالي الزيادة في كفاءة الضخ بشكل كبير84% من طاقة أيونات السيريوم Ce^{+3} تنتقل إلى أيونات النيوديومNd^{+3} وذلك لوجود الانتقال غيرالمباشر من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى النيوديميوم Nd^{+3} مرورا بايونات الكروم الثلاثية Cr^{3+} [21].وبالتالي يتم حساب نسبة التطابق والتداخل بين نطاق الامتصاص للوسط الفعال المطعم (Ce:Cr:Nd:YAG) و طيف الاشعاع الشمسي المنبعث كالتالي :

- نسبة التداخل في الوسط الاول (NdYAG) بقيمة 16%.
- التطعيم بأيونات الكروم الثلاثيCr^{+3} أدى إلى تحسين في نسب التداخل بقيمة 8 %.
- التطعيم بأيونات السيريوم الثلاثي Ce^{3+} أدى إلى تحسين في نسب التداخل بقيمة 16 %.

بما أن 84% من طاقة أيونات السيريوم Ce^{+3} تنتقل إلى أيونات النيوديوم Nd^{+3} أي وجود ضياعات في عملية الانتقال غير المباشر للطاقة تنخفض قيمة التحسين في نسب التطابق والتداخل كالتالي :

$$16*0.84= \%13.44 \qquad (10\text{-}II)$$

وبالتالي يتم حساب نسبة التطابق بين طيف الانبعاث الشمسي وطيف الامتصاص للوسط **(Ce:Cr:Nd:YAG)** كالتالي :

الوسط **(Nd:YAG)** نسبة تطابقه 16 % ،التطعيم بالكروم زاد التحسين بنسبة 8% و التطعيم بالسيريوم أدى إلى التحسين بنسبة 13.44% وبالتالي نسبة التطابق الكلية للوسط **(Ce:Cr:Nd:YAG)** هي :

$$16+8+13.44=37.44\% \qquad (11\text{-}II)$$

II-5-8- آليات نقل الطاقة داخل الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG):

يسمح التطعيم المضاعف للوسط البلوري المطعم (NdYAG) بكل من أيونات الكروم Cr^{3+} والسيريوم Ce^{3+} الثلاثية بزيادة نطاقات الامتصاص لطيف الاشعاع الشمسي وبالتالي تحسين كفاءة الانبعاث الليزري ، حيث تتم عملية نقل للطاقة الإضافية الممتصة (المجالات الجديدة) من الأيونات المحسسة $(Ce^{+3}.Cr^{+3})$ إلى الأيونات المنشطة (Nd^{+3}) داخل الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG) من خلال عدة طرق حيث :

✓ بالنسبة لأيونات الكروم Cr^{3+}:

عند تسليط الإشعاع الشمسي تتحفز أيونات الكروم الثلاثي Cr^{+3} داخل الوسط من الحالة الأرضية إلى الحالة المثارة حسب المخطط التالي :

$$^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$$

$$^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$$

تسترخي بعدها هذه الإلكترونات إلى المستوي 2E داخل أيون الكروم Cr^{3+} ثم تنتقل إلى المستوي المكافئ داخل أيونات النيوديوم Nd^{+3} بانتقال غير المشع.

تنتقل مجموع الإلكترونات في النهاية من المستوي $^4F_{3/2}$ إلى ^4I محررة طاقة hv بطول موجي مناسب 1064 nm (شعاع ليزري).

✓ بالنسبة لأيونات السيريوم Ce^{3+}:

تنتقل الطاقة بين أيونات السيريوم Ce^{3+} والنيوديوم Nd^{3+} من خلال تراكب وتداخل نطاقات الانبعاث والامتصاص بين الأيونيين .

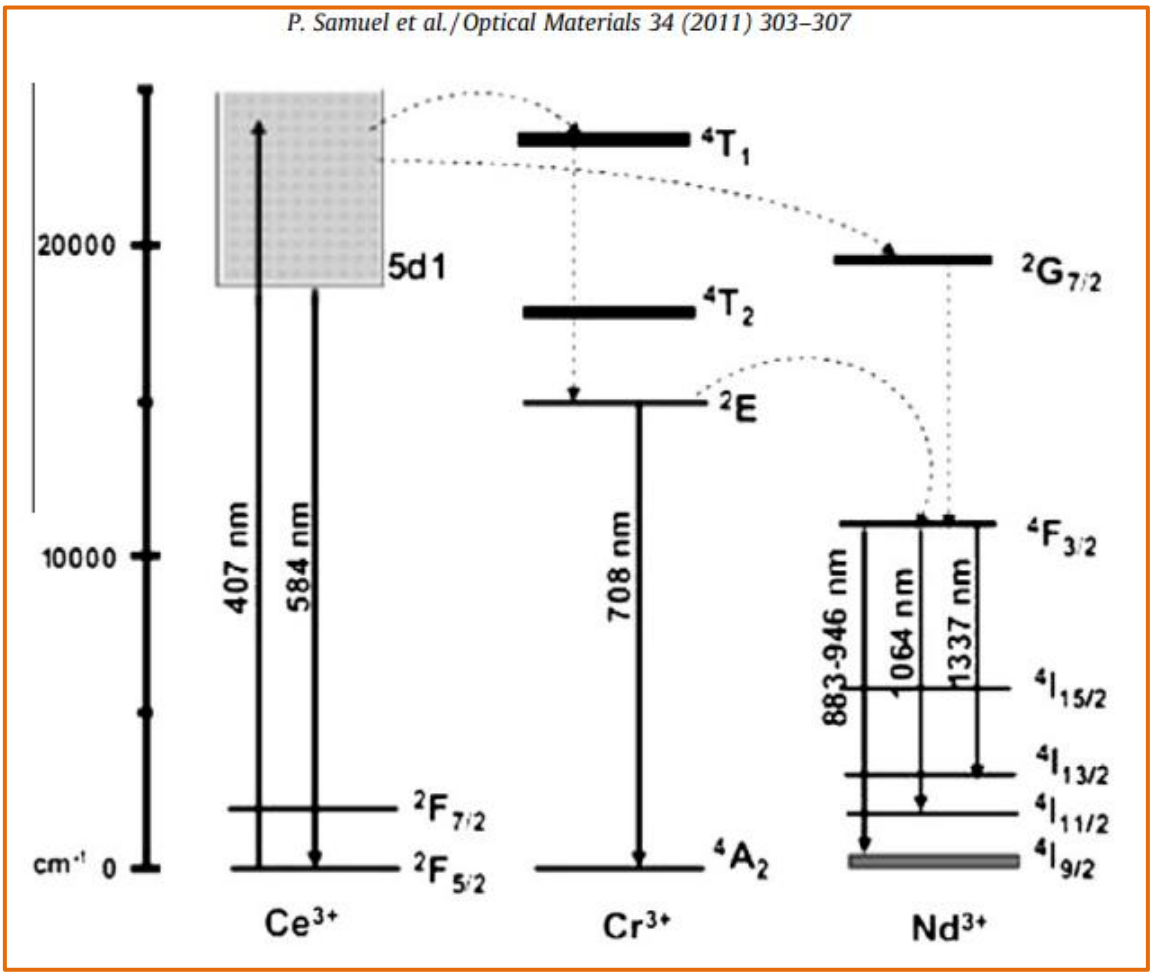
تتمتع أيونات السيريوم المطعمة Ce^{+3} بنطاقات امتصاص قوية للأشعة فوق البنفسجية و المناطق المرئية، حيث نسجل من خلال طيف الامتصاص قمتين عريضتين يتمركزان عند 339nm و 460nm.

ينتج عن هذه الامتصاصات طيف فلورة أخضر قوي وواسع يتمركز حول القمة 531nm والتي تتداخل بشكل ممتاز مع ذروتي الامتصاص لأيونات النيوديوم Nd^{3+} حول 531 nm و 589 nm مما يسمح بعملية نقل الطاقة من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديوم Nd^{3+} المسؤولة عن الفعل الليزري.

الإمكانية الثانية لنقل الطاقة هي عن طريق ظاهرة القطع الكمي للأشعة تحت الحمراء القريبة و التحويل التنازلي للفوتون الممتص ، حيث أن طاقة الانتقال بين المستويين $^5d_1 \rightarrow {}^2F_{5/2}$ لأيون السيريوم Ce^{3+} هي تقريبا ضعف فرق الطاقة بين المستوين $^4f_{3/2}$. $^4I_{11/2}$لأيون النيوديوم Nd^{+3}.

✓ الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG):

بالإضافة إلى آليات الانتقال الطاقوي المذكورة سابقا، يتمتع الوسط الفعال المطعم (Ce:Cr:Nd:YAG) بوجود انتقالات طاقوية بصفة غير مباشرة من أيونات السيريوم Ce^{+3} إلى أيونات النيوديميوم الثلاثي Nd^{+3} مرورا بأيونات الكروم المطعمة Cr^{+3} والتي يتم توضيحها من خلال المخطط التالي:



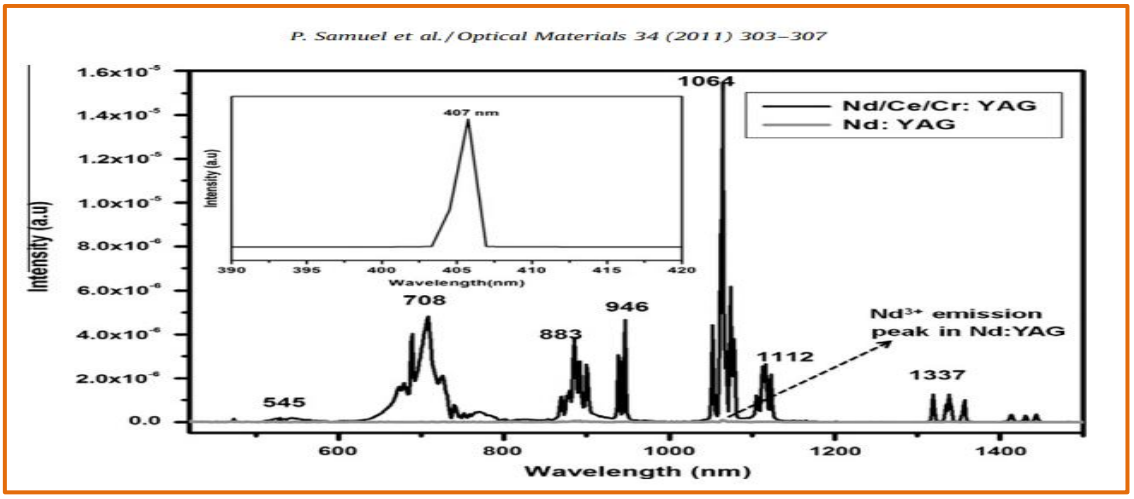
الشكل(II-19): مستويات الطاقة وآلية نقل الطاقة بين أيونات النيوديوم الكروم السيريوم تحت ضخ قدره 407nm [21].

مسار الانتقال المباشر: نلاحظ انتقال الإلكترونات بصفة مباشرة من أيونات السيريوم من الحزم d_{15} ^{5} إلى الطبقة $^2G_{7/2}$ ثم $^4F_{3/2}$ داخل أيونات النيوديميوم.

مسار الانتقال غيرالمباشر: نلاحظ انتقال الالكترونات من أيونات السيريوم من الحزم d_1 ^{5} إلى المستوي $^4T_1$ في أيونات الكروم ، تسترخي بعدها هذه الالكترونات إلى المستوي 2E داخل أيون الكروم ، تنتقل بعدها الى أيونات النيوديميوم إلى المستوي المكافئ $^4F_{3/2}$.

يتضمن هدا المسار ضياعات عديدة للطاقة تتمثل في التفاعل بين أيونات الكروم والسيريوم و عمليات الاسترخاء(تفريغ الطاقة على شكل حرارة) وكذلك الالكترونات في المستوي 2E داخل أيون الكروم والتي ينزل بعضها إلى المستوي A_2

كما يمثل المخطط التالي طيف الانبعاث للوسطين (Nd:YAG)و(Ce:Cr:Nd:YAG) بواسطة ضخ خارجي قيمته 407nm:

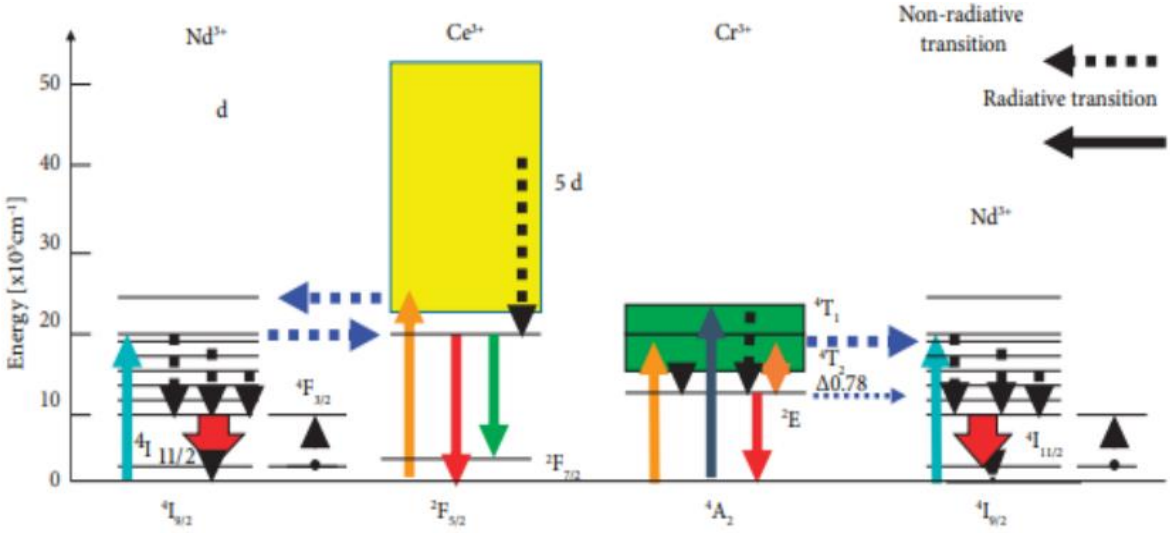


الشكل(II-20): طيف الانبعاث للوسطين (NdYAG) و(CeCrNdYAG) بواسطة ضخ خارجي قيمته 407 nm [21].

- يتوافق الانبعاث الHخضر للعينة ذات الذروة الأقل كثافة و المتمركزة عند 545nm مع التجولات 4F ⟶ 5D لأيونات Ce^{3+}.
- الانبعاث الأحمر ينشأ من أيونات الكروم Cr^{3+}.
- يرجع الانبعاث عند 708 إلى الانتقال الإلكتروني لأيونات الكروم Cr^{3+} من النطاقات المثيرة $T_1.T_2$ الي النطاق المستقر A_2.
- تساهم التحولات من المستوي 2E لأيونات الكروم Cr^{+3} في خطوط الانبعاث الإضافية بالقرب من 708nm.
- ترجع القمم المسجلة عند 883nm و946nm إلى التحولات (I،F) على التوالي كما تتوافق القمم :

1064 F ⟶ I 1337 F ⟶ I.

- تتشابه قمم الانبعاث المختلفة التي تزيد عن 800 تقريبا مع قمم الانبعاث التي لوحظت عند الاثارة 803 وهي قمم الانبعاث لـ Nd^{3+} المميز للمستوي المثار $F_{3/2}$ ^{4} إلى مختلف المستويات الأرضية لأيونات Nd^{+3}.
- كما يوضح المخطط التالي رسم تحطيطي لآلية نقل الطاقة الممتصة من أيونات السيريوم Ce^{+3} و الكروم Cr^{+3} إلى أيونات النيوديميوم Nd^{+3} داخل الوسط الفعال (Ce:Cr:Nd:YAG)



الشكل(II-21): مخطط نقل الطاقة داخل الوسط (Ce:Cr:Nd:YAG).

II-9- خلاصة:

في هذا الفصل تعرفنا على الإشعاع الشمسي وخصائصه ثم تطرقنا إلى المواد الليزرية الصلبة حيث وجدنا أن أفضل وسط ليزري هو *Nd:YAG* لما له من خصائص فيزيائية وحرارية ميزته عن باقي الأوساط الأخرى، ومن المعلوم أن نسبة تطابق طيف امتصاصه مع طيف الانبعاث الشمسي تقدر بحوالي 16 %

تعتبر هذه النسبة ضعيفة نسبيا مما جعل الباحثين يلجؤون إلى تقنية التطعيم المضاعف حيث *تم تطعيم الوسط* Nd:YAG *بأيون* الفلز *الانتقالي* Cr^{+3} فأدى هذا إلى تحسين نسبة التطابق حيث بلغت حوالي 24 % لكنها لم تبلغ النسبة المرغوب فيها ، بعدها لجؤوا إلى التطعيم بواسطة أحد أيونات الأتربة النادرة Ce^{+3} فوجدنا كذلك تحسنا في نسبة التطابق والتي بلغت حوالي 32 % ،هذه النسبة لم تصل الحد المرغوب فيه مما أدى في الأخير إلى التطعيم باستعمال أيونات Cr^{+3} و Ce^{+3} في آن واحد مما جعل النسبة تبلغ حوالي 37.44% .

في الفصل القادم يتم استعمال المحاكاة العددية باستعمال برنامجي Zeemax و LASCAD لمحاكاة أداء الأوساط الفعالة Nd: YAG و Cr: Nd:YAG و Ce:Nd:YAG و Ce:Cr:Nd:YAG بغية التعرف على تأثير التطعيم على الأوساط الفعالة المذكورة سابقا ، ويتم تحليل ومناقشة النتائج المتحصل عليها

قائمة مراجع الفصل الثاني

❖ المراجع العربية:

[1]سعود يوسف عياش،"تكنولوجيا الطاقة البديلة "،كتاب صادر عن عالم المعرفة ،كتاب صادر عن المجلس الوطني للثقافة والفنون و الآداب ،الكويت ص155(1978).

[2]نور الدين حمروني ،" ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين" ، أطروحة دكتورا ،جامعة لشهيد حمه لخضرالوادي،الجزائر ص ص105-109(2021).

[3]يمينة كرمية ، "ضخ الأوساط الفعالة بالإشعاع الشمسي ،حالة الليزر" ،مذكرة ماجستير ،جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي ص ص 46-50(2003)

[4]بيلّا آ.لينكيل .ترجمة فاروق عبودي قيصر ،" الليزرات "،كتاب صار عن دار الكتب للطباعة و النشر ،الموصل العراق، ص 200(1984)

[5]عدي عطا حمدي ،" أساسيات الليزر وتطبيقاته لطلبة الدبلوم الفني في الاتصالات "، كتاب صادر عن دار الكندي للنشر والتوزيع ،عمان ،الأردن ،ص 51 (2004).

[25]السيدة رقية التيجاني ،الزهرة رزاق زوازي ،"تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي بـ Nd:YAG باستعمال التطعيم المضاعف بواسطة : "Cerium،مذكرة ماستر ،جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي الجزائر ،ص ص 16- 20(2023)

❖ المراجع الأجنبية:

[6]Dawei Liang.Joana Almeida.Claudia.Vistas.Bruno Tubircio.Dario Garcia"Solar-Pumped Lasers with examples of numerical Analysis of solid –state Lasers"pp81-166(2023)

[7]Y.Abdel-Fattah ABDEL-Hadi,"Developement of optical concentrator systems for directly solar pumped lasers systems ",these de doctorat,technical university of Berlin,Institut of Optics, p5(2005).

[8]S.Mehellou,"pompage optique des lasers par faisceau solaire."These de Doctorat,Universite Kasdi Merbah – Ouargla, Algerie,pp88-105.(2018)

[9]D.A.Atwood,"The Rare Earth Elements:Fundamentals and Applications." John Wiley and Sons,USA.P29 (2013)

[10] W .Koechner and M. Bass "Solid –State Lasers :A Graduate Text(Advenced Texts in Physics)."Springer Science & Business Media,USA p61 (2006).

[11]"Gem Reference Guide " ,Gemological Institute of America (GIA),USA ,P.270(1998).ISBN 0-87311-019-6

[12]B.T. Do and A.V Smith,"Bulk optical damage thresholds for doped and undoped ,crystalline and ceramic yttrium aluminium garnet " Applied Optics,vol.48.no.18.pp.3509-3514(2009).

[13]A.Beggas,"Etat d'art des verres dopés aux ions terres rares : Application Amplificateur Optique."Thèse de Magister, Centre Universitere d'El-oued,Algerie,p.162(2010).

[14]Orazio svelto ,TDAVID C. Hanna,"principle of lasers" fourth eddition, polytechnic Institut of mian and National Reseach council milan,Italy p 380(1998)

[15]j.E.Geusic,H.M.Marocs,and L.Van Uitert,"Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminium,yttrium gallium and gadolinium garnets ,"Appl.Phys.Lett.,vol.4,no.10 pp.182-184(1964).

[16]Z.Bin,Z.Changing,and H.Jianwei, "The study of active medium for solar –pumped solid-state lasers," Acta Opt. Sin, vol. 27, no.10, p.1797(2007).

[17]H.Yagi,T.Yanagitani,H.Yoshiba,M.Nakatsuka,K.Ueda,"The optical properties and laser characteristics of Cr^{+3} and Nd^{+3} co-doped $Y_3Al_5O_{12}$ ceramics", Japan,vol 45 ,No1A,pp133-135(2006)

[18]T.Saiki,T.Iwashita,J.Sakamoto,T.Hayashi,T.Nakamachi,Y.Fujimoto,Y.Iida,and M.Nakatsuka,"Rod-Type Ce/Cr/Nd:YAG Ceramic Lasers with White-Light Pump Source"Hindawi international journal of Optics,Volume 2022,Article ID 8480676,10 Pages.

[19]P.Samuel,G.A.Kumar,Takagimi Yanagitani,Hideki Yagi,Ken Ichi Ueda,S.Moorthy Babu,"Efficient energy transfert between Ce^{+3}/Cr^{+3} and ions in transparent Nd/Ce/Cr:YAG ceramics",Optical Materials,vol34,pp 303-307(2011)

[20]Almeida,D.,J.,Liang,D,Garcia,D.,Tuburcio,B.D.,Costa,H.,Catela,M.,Guillot,E.,Vistas,"40W Continous Wave Ce:Nd:YAG Solar Laser through a Fused Silica Light Guide.Energies 2022,15,3998

[21]P.Samuel,G.A.Kumar,Takagimi Yanagitani,Hideki Yagi,Ken Ichi Ueda,S.Moorthy Babu,"Efficient energy transfert between Ce^{+3}/Cr^{+3} and ions in transparent Nd/Ce/Cr:YAG ceramics",Optical Materials,vol34,pp 303-307(2011)

[22]B.Gazolin,J.Saeed,F.Sheikhani,"Study and Simulation of Solar Pumping for Nd:YAG Laser Using ZEMAX Program "Tishreen University Journal for Research and scientific Studies –Basic Sciences Series Vol.(44) No.(3)2022

[23]Sonam Berwal,Neha Khari,Daewook kim,"A review on design modalities of solar – pumped solid – state laser" Applied Surfface Science Advances, 12(2022)100348

[24]C.R.Vistas,D.Liang,D.Garcia,M.Catela,B.D.Tubircio,H.Costa,E.Guillot,J.Almeida"Uniform and Non-Uniform Pumping Effect on Ce:Nd:YAG Side-Pumped Solar Laser Output Performance"Energies 2022,15,3577

الفصل الثالث

النمذجة والمحاكاة العددية ومناقشة النتائج

III-1- تمهيد:

يعد مجال الليزر الشمسي من أبرزميادين العلوم الحديثة حيث يتم فيها استغلال طاقة الشمس غزيرة الوفرة و المتجددة لإنتاج الاشعة الليزرية، ويتم ذلك من خلال تركيزالإشعاعات الشمسية وتوجيهها ثم تسليطها على الوسط الفعال للمنظومة الليزرية قصد تحفيزها لإنتاج شعاع الليزر.

في هذا الفصل سوف نقوم بعملية النمذجة ثم المحاكات العددية لمنظومة الليزر الشمسي وذلك باستعمال برنامجي Zemax و LASCADوذلك لرصد اكبراستطاعة ممكنة يمكن امتصاصها من طرف الوسط الفعال وكذلك استطاعة الليزر الناتج ومتابعة التطور في هذه النسب.

- يعمل برنامج Zemax على حساب الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال.

- يقوم برنامج LASCAD بتحديد شكل حزمة الليزر وحساب استطاعتها [1].

- نقوم بعملية المحاكات العددية للمنظومة الليزرية ونغير في كل مرة الوسط الفعال المستخدم حيث :

- ✓ الوسط الأول : عقيق الإيتريوم الألمنيوم المُطعم بالنيوديميوم (Nd:YAG).
- ✓ الوسط الثاني : عقيق الإيتريوم والألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديوم و الكروم (Cr:Nd:YAG).
- ✓ الوسط الثالث: عقيق الإيتريوم وّالألمنيوم ذو التطعيم المضاعف بالنيوديميوم والسيريوم(Ce:Nd:YAG).
- ✓ الوسط الرابع : عقيق الإيتريوم والألمنيوم المُطعم بكل من النيوديوم والكروم والسيريوم (Ce: Cr :Nd:YAG).

III-2- المحاكات العددية:

تتم عملية المحاكات العددية باستعمال برنامجي المحاكات Zemax و LASCAD

حيث:

Zemax: يسمح بنمذجة الأنظمة البصرية و تحليلها و المساعدة على تصميمها.

LASCAD: يعمل على الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنان الليزر[1]

III-2-1- برنامج Zemax لتصميم منظومة الليزرالشمسي:

هو برنامج يمكنه نمذجة الأنظمة البصرية وذلك بواسطة المحاكات وهو ذو استخدام واسع حيث يستعمل لتصميم الأنظمة الضوئية وتحليلها أُطلق أول إصدار له عام 1990 تحت اسم MAX كأول برنامج تصميم بصري لـ Windows. يعتمد أساسا هذا البرنامج على تتبع الأنظمة و الحزم الضوئية ونمذجتها من خلال نظام بصري كما يمكنه تصميم عناصر بصرية مختلفة مثل العدسات العادية و شبه الكروية و المرايا، كما يحوي البرنامج مكتبة ضخمة للأنظمة الضوئية المختلفة كما يمكن إضافة عناصر ضوئية جديدة لمكتبته. [1] ،[2]

يحوي البرنامج على نافذة رئيسية يمكن من خلالها فتح العديد من النوافذ الثانوية.

النافذة الرئيسية تشتمل على كل العناصر المستعملة في المنظومة البصرية ممثلة بالمواد المتكونة منها، احداثياتها بالنسبة للمحاور الثلاثة مع زاوية الدوران حولها والخصائص المتنوعة من عنصرلآخر، ونعرف بعض النوافذ الرئيسة في برنامج Zemax نسخة 2014 كما يلي: [3]

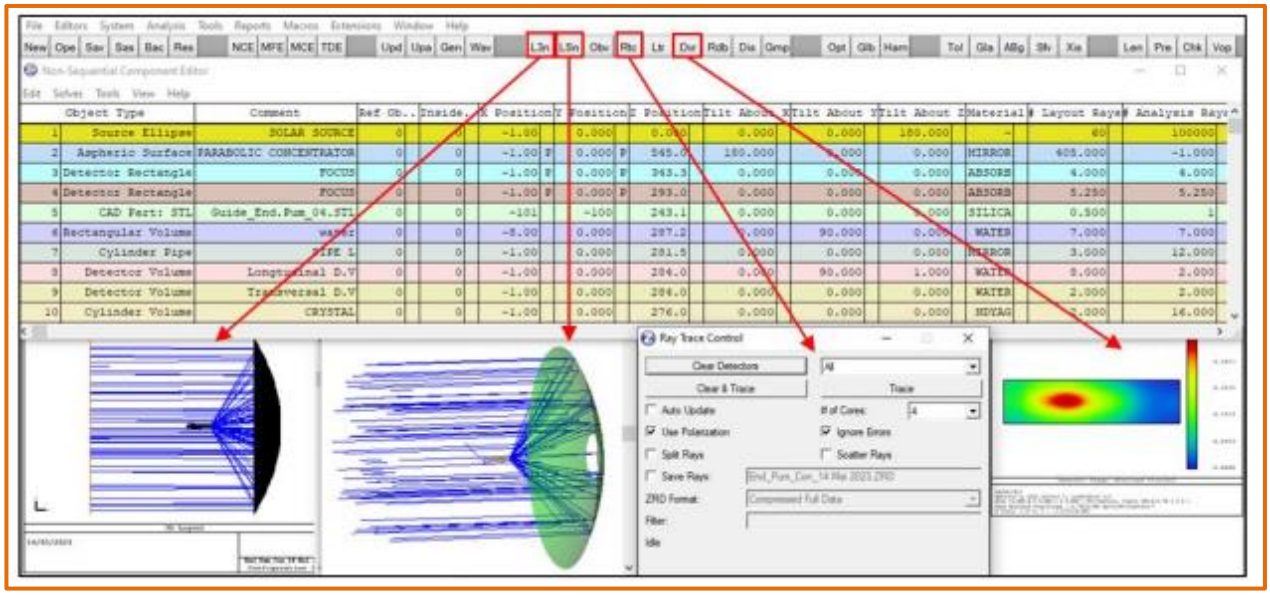
النافذة الرئيسية: وتحتوي على عديد رؤوس الاقلام المنسدلة مثل : (File, Editors, System, Analysis, Tools, Help...).

نافذة المحرر: تستخدم أساسا لعملية إدخال البيانات.

نوافذ النص: وتظهر فيها البيانات النصية والرقمية مثل بيانات التعليمات والزوايا.

الحوارات: أي نوافذ حوار نظام التشغيل Windowse وتوجد فيها حوارات وتعيمات صريحة عادة مثل أزرار " موافق" و "إلغاء".

يمثل الشكل التالي نافذة برنامج Zemax مفتوحة:



الشكل(III-1): نافذة برنامج Zemaxمفتوحة.

المصادر: وهي العناصر التي تمثل مصادر الضخ وبالتالي الكائنات التي تستخدم لإصدار أشعة المحاكاة وتتمثل بضوء الشمس في نظام الليزر الشمسي.

❖ العناصر البصرية والهندسية:

وهي مكونات نظام تجميع وتركيز الطاقة الشمسية ومكونات رأس الليزر ويتم في هذه المكونات امتصاص الأشعة المنبعثة ، انكسارها ، انعكاسها ، انجرافها ، تشتتها وتقسيمها ....

❖ الكواشف:

وهي كائنات تعمل على تحديد ورصد المعلومات المختلفة للأشعة الواردة كما ونوعا.

❖ تحليل طاقة الضخ الممتصة:

يجب استخدام كائنات الكاشف في Zemax للتمكن من معرفة المعلومات الخاصة بطاقة الضخ الواردة أو الممتصة مثل اكتشاف المعلومات الوفيرة في بؤرة المركز أو لأي عنصر من عناصر المنظومة.

في العادة يتم استخدام الكاشف المستطيل، حيث يسمح بتسجيل أكبر قدر ممكن 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 الكواشف إما داخل أو خارج الجسم و له وظيفة الامتصاص أو الانعكاس أو عدم وجود أي تأثير على الإشعاع الساقط ومع ذلك يقتصر شكل الكاشف على سطح مستطيل يحدده المستخدم ، كما يمكن ضبط دقة الصورة عن طريق تحديد عدد وحدات البيكسل للكاشف، و في كل محاكاة تمت، يتم مراعاة التأثير على إجمالي الوقت المطلوب.

كذلك يتم استخدام كاشف حجمي لتحليل طاقة الضخ الواردة أو الممتصة داخل الوسط الفعال، كما يمكن إضافة بعد جديد للحصول على معلومات الطاقة نظرا لأنه يحتوي على شكل متوازي السطوح ،حيث يتم تحديد الأبعاد من قبل المستخدم وكذلك عدد وحدات الفوكسيل أي النقاط الحجمية[1]

تتم معالجة بيانات تدفق الضخ الممتصة من تحليل Zemax بواسطة برنامج LASCAD

لدراسة معلومات شعاع الليزر وتحديد التأثيرات الحرارية المطبقة في الوسط الفعال.

III-2-2- برنامج LASCAD لمحاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي:

- ❖ يسمح برنامج LASCAD (LASer Cavity Analysis & Design) الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنان الليزر حيث:
- ❖ تحليل العناصر الحرارية والبنيوية المتناهية (FEA: Finite Element Analysis)
- ❖ دليل الانتشار للحزمة الغاوسية ABCD
- ❖ 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 تعد واحدة من المشاكل الرئيسية في ليزر الحالة الصلبة) ،طاقة خراج الليزر متعدد الأنماط TEM00 كفاءة الليزر، جودة شعاع الليزر، وكذلك انتشار شعاع الليزر خارج تجويف الليزر، مع الأخذ بعين الاعتبار العديد من ثوابت الليزرية مثل الانعكاسية ونصف قطر الانحناء والمسافة بين مكو نات التجويف وخسائر الانعراج وربح التشبع ... إلخ[4] ، [1]

❖ نافذة برنامج LASCAD:

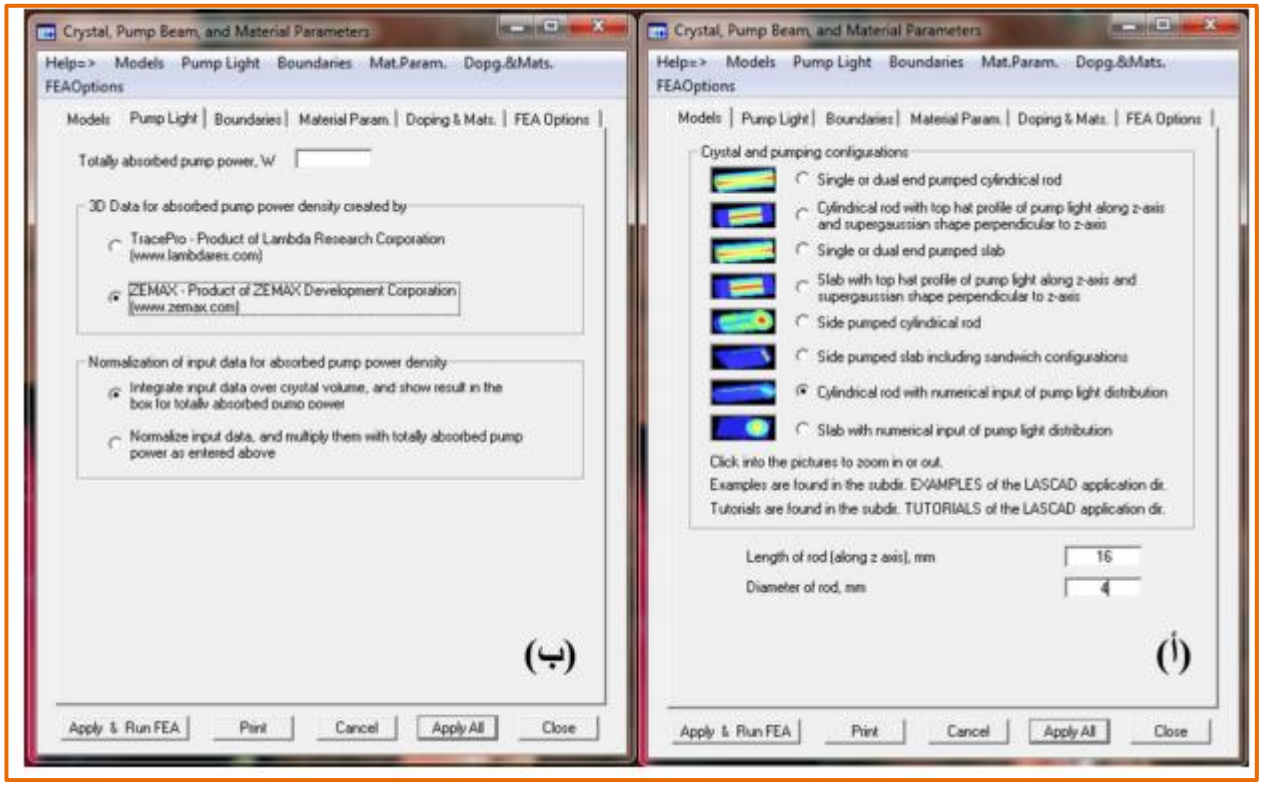
صورة للبرنامج

الشكل(III-2): صورة لبرنامج LASCAD .

III-2-2-1- تحليل العناصرالمتناهية (FEA) للتأثيرات الحرارية:

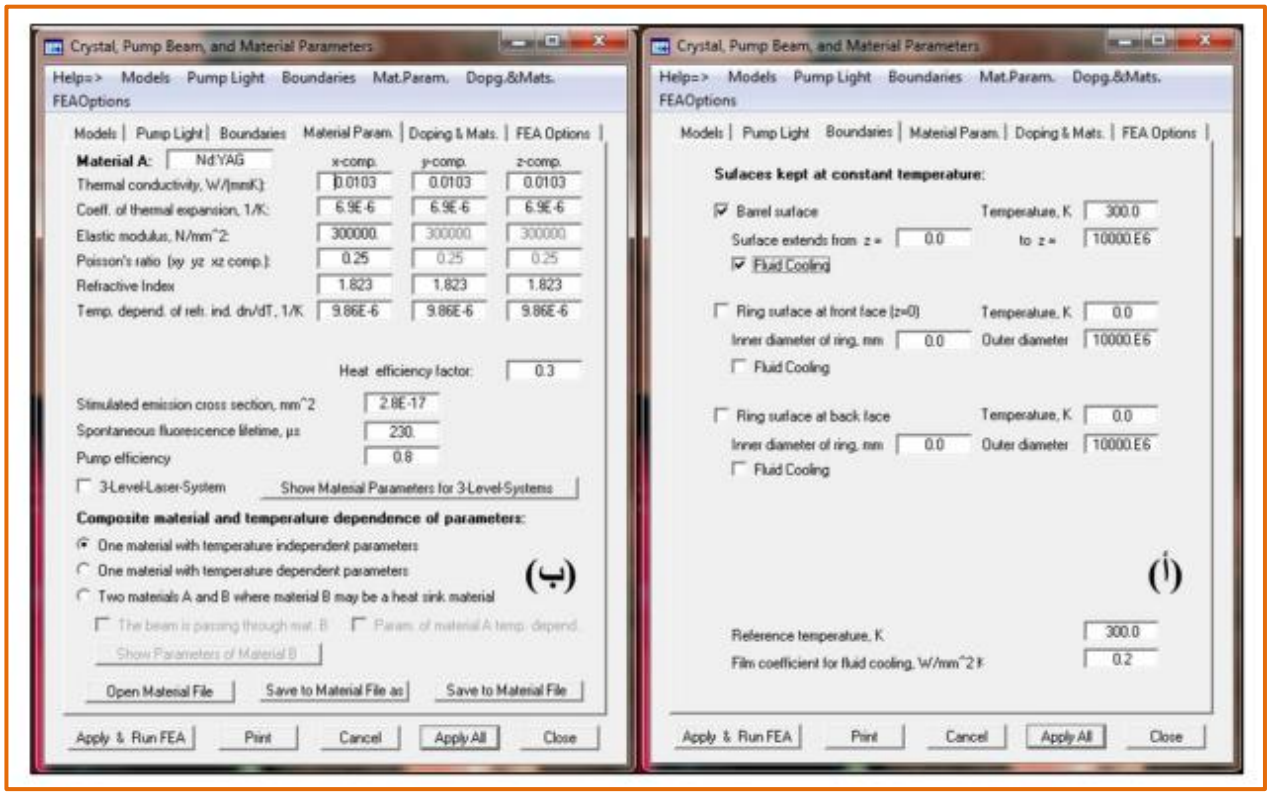
يقوم بحساب المتغيرات الناتجة عن الضغط والحرارة داخل بلورة الليزرمع الأخذ بعين الاعتبار متغيرات مادة الليزرومكونات مصادرالضخ وهندسة التبريد.

يسمح برنامج LASCAD بتوفيرعدة نماذج محددة سابقا للتصاميم النموذجية ، كما يوضحه الشكل (III-6)، ورغم ذلك فإنه عند لحظة الضخ توجد خصائص أخرى لم يتم تحديدها سابقا في البرنامج مثل الليزرالذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية ولضمان دقة عملية النمذجة، يمكن استيراد الملفات من برنامج المحاكاة Zemaxالذي يمثل محتواه التوزيع الثلاثي الأبعاد لطاقة الضخ الممتصة بواسطة الوسط الفعال المحدد من قبل في Zemax. [1]



الشكل(III-3): أ: نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامج LASCAD.

ب: تحديد مصدر الاستطاعة الممتصة من الوسط الفعال من خلال ملفات برنامج Zemax ®.



الشكل(III-4): أ: متغيرات تحديد درجة حرارة الغرفة.**ب:** متغيرات مادة الوسط الفعال(YAG:Nd).

III-3- طريقة انتشارشعاع الليزر(BPM):

في بعض الحالات يكون فيها التقريب المكافئ ورمز مصفوفة ABCD غير كافيين للمحاكاة المثالية، يمكننا استخدام نتائج FEA كمدخلات لطريقة انتشار الحزمة (BPM) لتحويل فورييه السريع. [5]

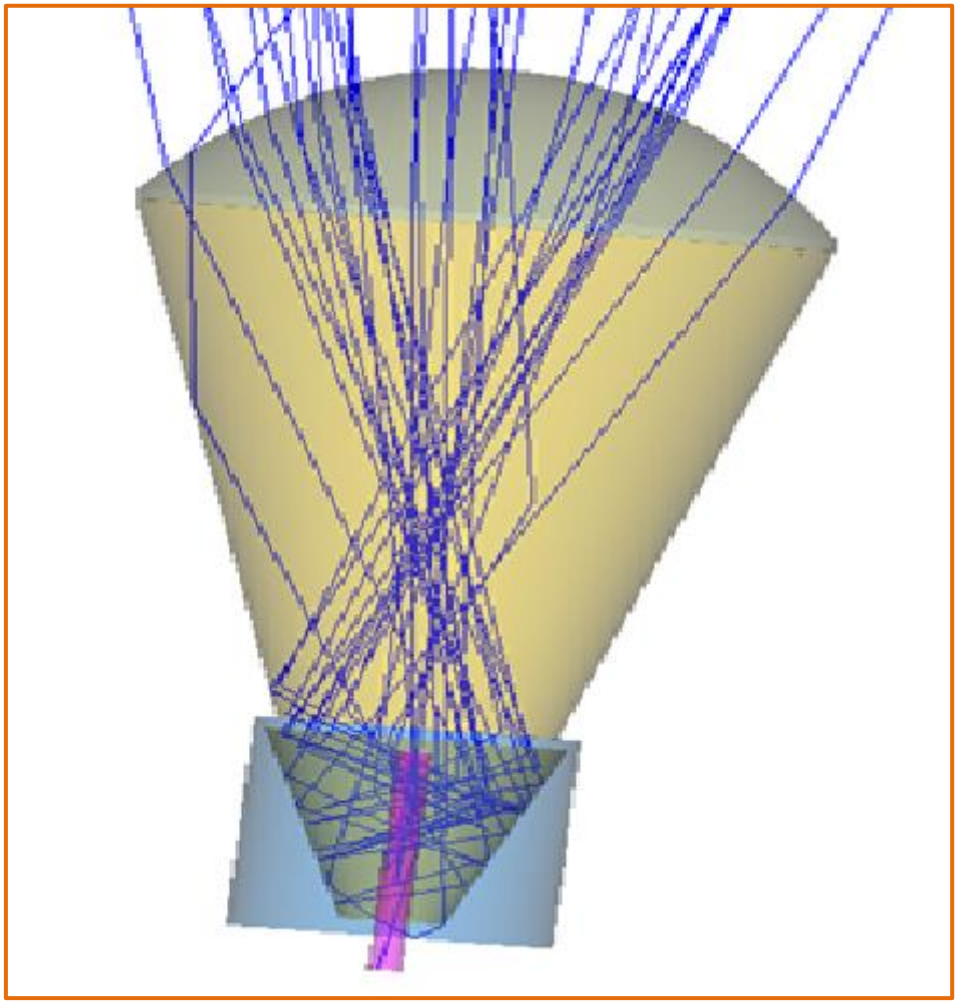
يوفر هذا الرمز محاكاة ثلاثية الأبعاد كاملة لتفاعل واجهة موجة تنتشر عبر بلورة الليزر الساخنة المشوهة حراريا استنادا إلى مبدأ Li و Fox

نقوم بحساب سلسلة من الرحلات ذهابا وإيابا عبر الرنان والتي تتخامد في النهاية إلى الوضع الأساسي شكل 6، أو لتراكب الأنماط العرضية ذات الترتيب الأعلى، كما يتم وضع ملف تعريف الكثافة في مرآة الإخراج، حيث يتطور مع زيادة عدد التكرارات خلال حساب الدورات، كما هو ملاحظ، في شكل 6، طريقة انتشار BPM تأخذ أيضا في الحسبان ديناميكيات الكسب وتأثيرات الانعراج بسبب الامتداد المحدود للفتحات والمرايا [6].

III-4- مّنظومةالليزرالشّمسيّ:

وتتكون من العناصر التالية :

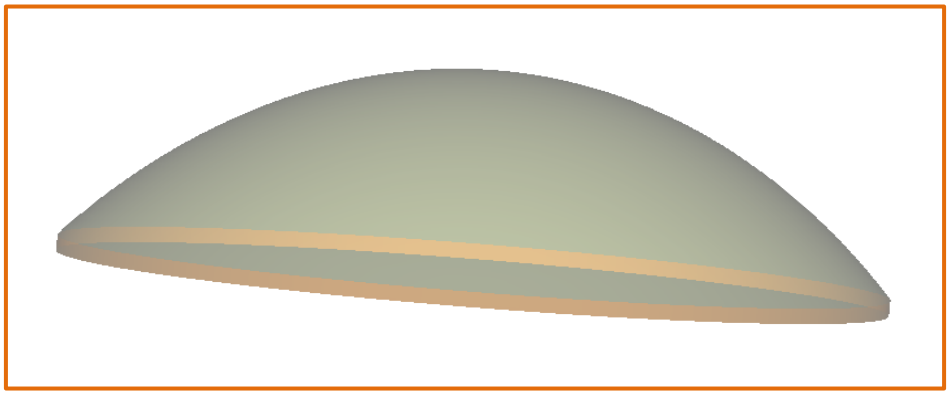
- منظومة التركيزالأولية (عدسة فرينل).
- الدليل الموجي.
- التجويف البصري.
- الوسط الفعال.
- التجويف الرنيني.
- حوض التبريد.



الشكل(III-5): منظومةالليزرالشمسي.

III-4-1– مّنظومة التركيزالأولية (عدسة فرنييل):

نستخدم عدسة فرينل ذو نصف قطرD =450 nm .

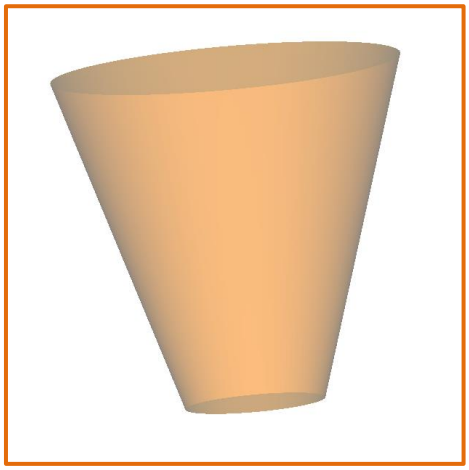


الشكل(III-6): العدسة (القطر 60 مم ، الارتفاع 18 مم).

III-4-2– الدليل الموجي:

وهوعبارة عن قناة مصنوعة من مادة السليكا التي تتميز بنقاوة بصرية عالية وشفافيتها للطول الموجي الذي يمتصه النيوديميوم حيث تخضع الأشعة بداخله لمبدأ الانعكاس الكلي اعتمادا على الفرق والاختلاف في قرينة الانكسار بين المادة الفعالة والهواء، يتمثل دورهذا الدليل الموجي في نقل الأشعة المركزة من البؤرة إلى الوسط الفعال مع الحفاظ عليها من التشتت، و يتم اختيار شكل الدليل على حسب نوع التركيز(نقطي أو خطي à) وطريقة الضخ.

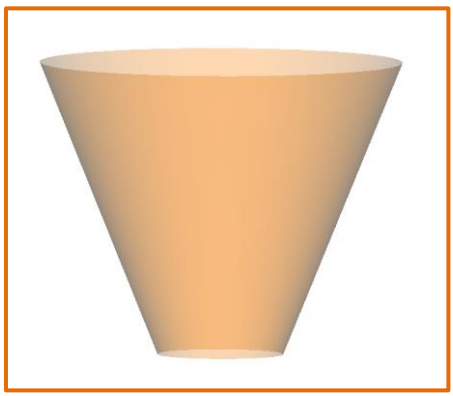
بما أنه تم استعمال عدسة فرنيل، لذا تم اختياردليل موجي يتناسب مدخله مع قطرالبؤرة.



الشكل(III-7): الدليل الموجي(القطر العلوي 60 مم ، القطر السفلي 12 مم الارتفاع 58مم).

III-4-3– التجويف البصري:

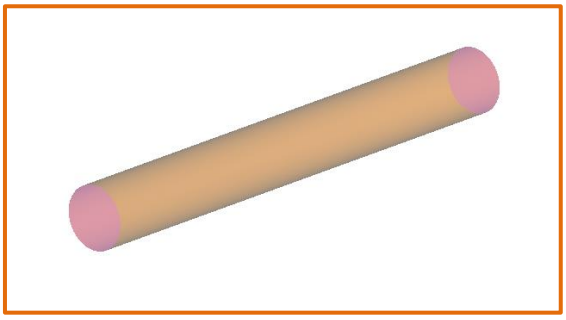
ويكون على شكل قمع يعمل على ضمان توزيع الأشعة على كامل جوانب القضيب باستعمال تجويف بصري تكون أسطحه الداخلية على شكل مرايا ذات درجة انعكاسية عالية، وذلك لتجنب الضياع في الإشعاع ، يكون في قطرالمدخل.



الشكل(III-8): التجويف البصري(القطر العلوي 13 مم ، القطر السفلي 4.5 مم الارتفاع 21مم).

III-4-4- الوسط الفعال:

الوسط الفعال الأكثر استخداما في منظومة الليزر الشمسي هو Nd:YAG.

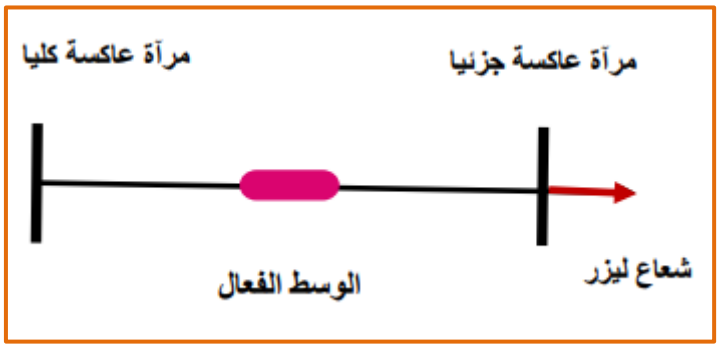


الشكل(III-9): الوسط الفعال (القطر 3 مم ، الطول25 مم) Nd:YAG.

المكون من بلورة YAG أي ايتيريوم الأمنيوم الغارنيت مطعمة بأيونات Nd^{3+} أحد عناصر الأتربة النادرة. لغرض تحسين أداء النظام الليزري نقوم بعملية التطعيم المضاعف لهذا الوسط المذكور مرة بالتطعيم المضاعف بواسطة ذرات الكروم Cr^{+3} ومرة أخرى بالقيام بعملية التطعيم المضاعف بواسطة ذرات السيريوم Ce^{+3} ونختم البحث التجريبي خاصة بإضافة كلي العنصرين معا بنسب مدروسة ثم رصد النتائج وتحليلها.

III-4-5- التجويف الرنيني:

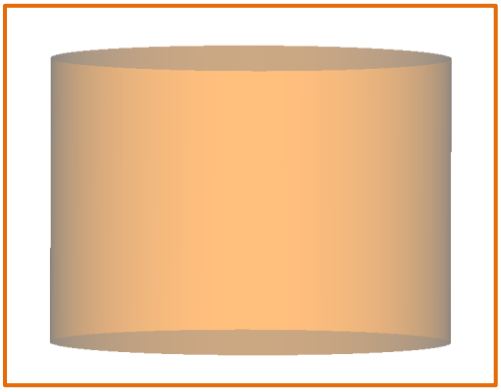
أي المرنان، وهو منظومة تتكون من مرأتين توضعان على محور بصري مشترك مع الوسط الفعال ، حيث تنتقل الفوتونات ذهابا وإيابا مرورا بالوسط الفعال من أجل تضخيمها، تكون إحدى هاتين المرأتين ذات انعكاسية كلية، بينما تكون الثانية ذات انعكاسية جزئية كما يبينها الشكل التالي:



الشكل(III-10): التجويف الرنيني.

III-4-6- حوض التبريد:

ويعمل على تخفيض درجة الحرارة للوسط الفعال التي ترتفع بشكل كبير عند توليد الليزر، وهذا ناتج عن الانتقالات غير المشعة والتي تكون مصحوبة بانتشار الحرارة.



الشكل(III-11): حوض التبريد (القطر 14 مم ، الارتفاع 24مم).

III-5- نتائج المحاكاة العددية:

لقياس نسب الاستطاعة نستعمل مجموعة من الكواشف في أماكن متعددة لنتمكن من رصد هذه النسب حيث:

- الكاشف الأول: كاشف سطحي، ويوضع عند البؤرة لقياس الاستطاعة المركزة.
- الكاشف الثاني: كاشف سطحي، ويوضع عند مخرج الدليل الموجي وذلك لقياس نسبة الاستطاعة المنقولة داخله وكذلك تقدير نسبة الضياعات فيه.
- الكاشف الثالث: كاشف حجمي، أي حول جميع نقاط الوسط الفعال ويستخدم لقياس الاستطاعة الممتصة من طرفه.

❖ قياس نسبة الاستطاعة عند البؤرة (كاشف 1) الوسط الفعال Nd:YAG :

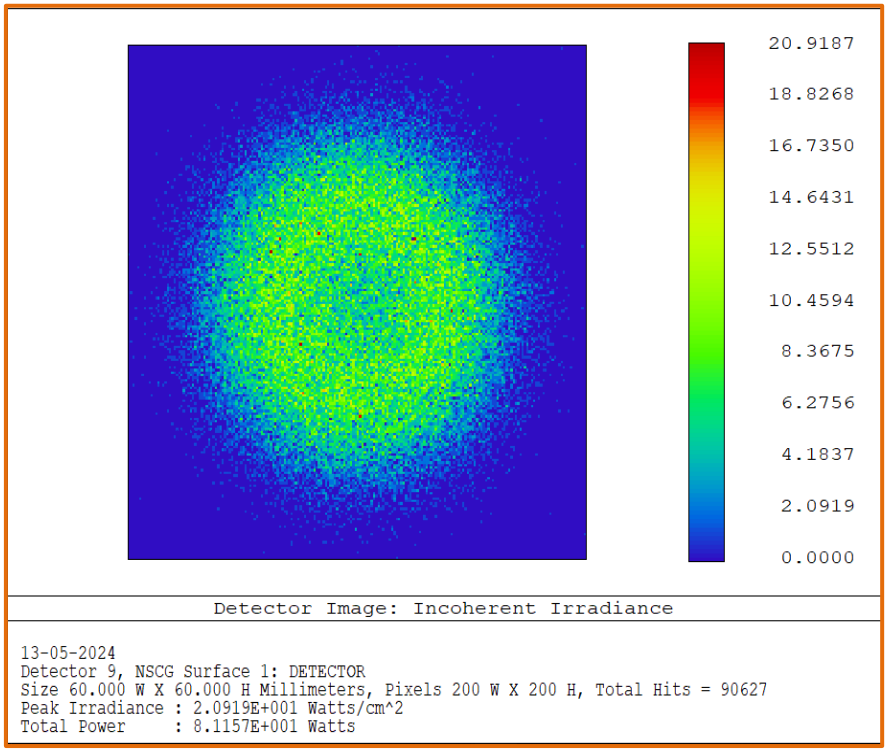
نستعمل إشعاعا شمسيا ساقطا على سطح الارض قيمته $950\ W/m^2$ [7]، [8] ، وعدسة فرنيل بنصف قطر قدره $R=0.45m$ ومساحة قدرها $0.635m^2$ وذلك لحساب استطاعة المنبع كالتالي:

$$950 \times 0.16 \times \pi \times R^2 = 97W$$

R: نصف قطر عدسة فرنيل

16% نسبة تطابق طيف الامتصاص لـ Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي [8].

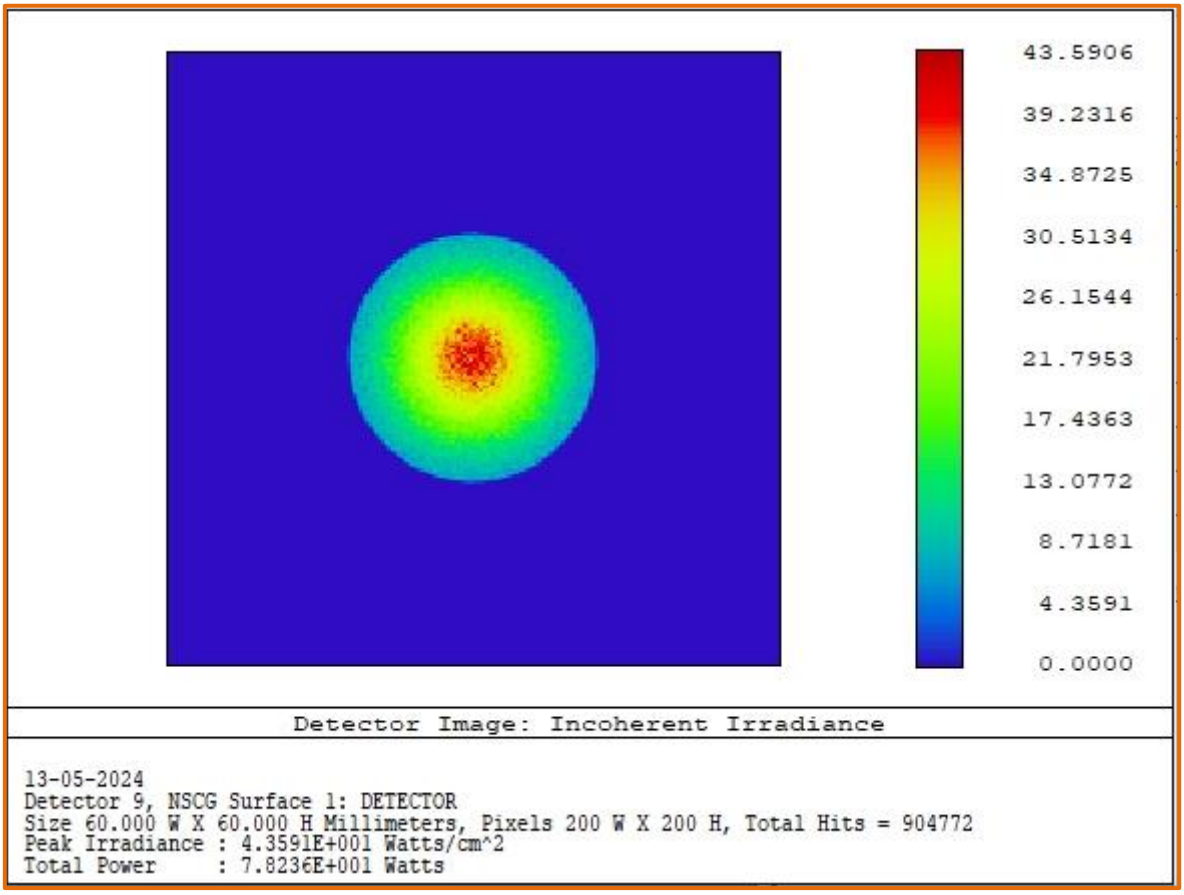
يمكّن الكاشف الضوئي الموجود داخل بؤرة العدسة من قياس نسبة الطاقة الشمسية المركزة داخل هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها وذلك بوضعه في المكان المناسب الاستطاعة المركزة المقاسة تساوي 81.15 w بتوزيع غوصي كما تظهره الصور التالية:



الشكل(12-III): نسبة الاستطاعة المركزة عند البؤرة 81.15w

❖ قياس نسبة الاستطاعة عند مخرج الدليل الموجي (كاشف 2):

❖ تم قياس نسبة الاستطاعةعند مخرج الدليل الموجي وذلك لتسليط الضوءعلى نسبة الضياعات داخل هذا الدليل (الامتصاص ، الانعكاس الداخلي غير التام) [9]، حيث يلاحظ انخفاض في قيمة الاستطاعة الطاقوية المسجلة كما تبينها الصور التالية :



الشكل(13-III): نسبة الاستطاعةعند مخرج الدليل الموجي.

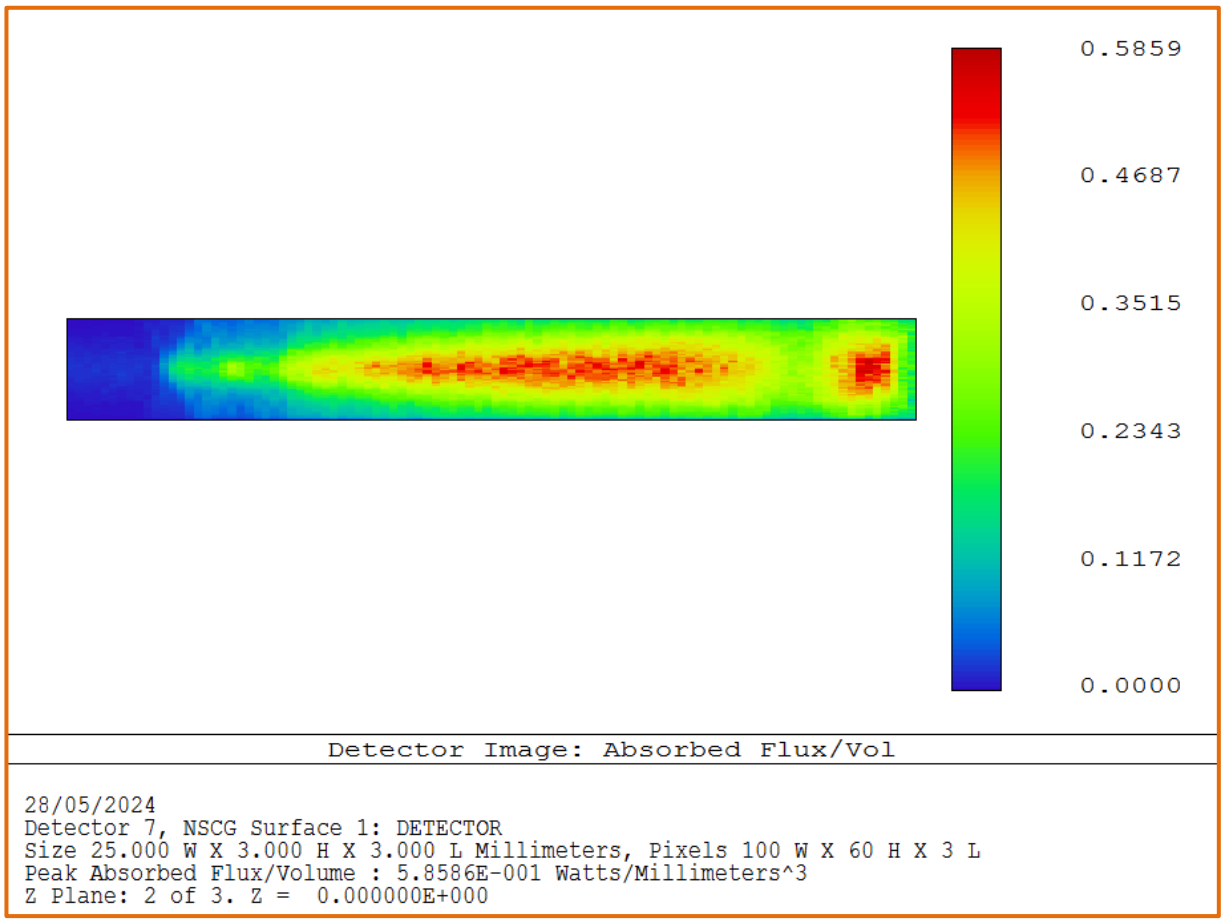
ويتم حساب كفاءة نقل الاشعة داخل الدليل الموجي كالتالي:

78.23÷81.15=0.96

يفسر هذا التناقص بعمليات الامتصاص المتواصلة داخل الدليل الموجي [9].

❖ قياس نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال ـ الكاشف الحجمي- الوسط Nd:YAG:

لقياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال Nd:YAG ومعرفة طريقة توزيعها، نستعمل في هذه العملية الكاشف الحجمي والذي يستخدم الفوكسيل (نقاط حجمية) كما توضحه الصورة التالية:

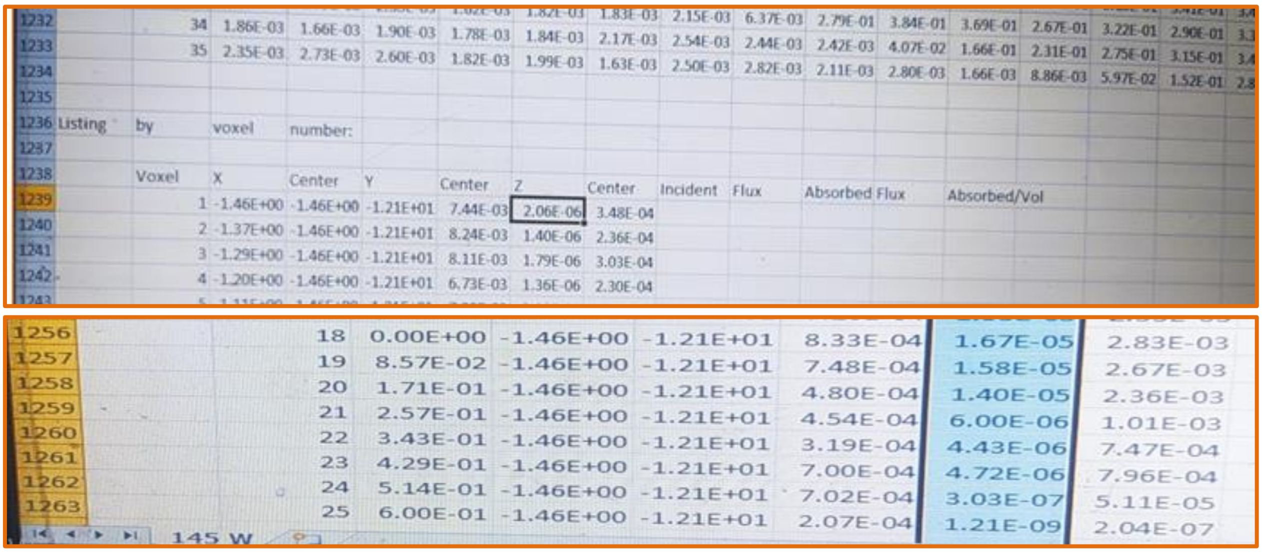


❖ **الشكل(III-14):** نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال –الكاشف الحجمي- الوسط .Nd:YAG

معرفة قيمة ونسبة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال- قضيب- بصفة مباشرة غير ممكن عمليا وهذا راجع إلى خصائص الكواشف المستخدمة، فعلى عكس الكواشف المسطحة، لا تعطي الكواشف الحجمية (شكل ثلاثي الابعاد) نتائج القياس مباشرة، ولهذا نستعين ببرنامج الجداول Excel.

تخزن البيانات في الصورة على شكل نص في ملف يتم فتحه فيما بعد في صفحة في برنامج Excel. بعد ذلك نجمع قيم الاستطاعة الممتصة في جميع نقاط الوسط الفعال المقاسة بواسطة الكاشف الحجمي.

نسجل في النهاية قيمة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال كما يوضحه الشكل التالي:



1232		34	1.86E-03	1.66E-03	1.90E-03	1.78E-03	1.84E-03	2.17E-03	2.54E-03	2.44E-03	2.42E-03	4.07E-02	1.66E-01	2.31E-01	2.75E-01	3.15E-01
1233		35	2.35E-03	2.73E-03	2.60E-03	1.82E-03	1.99E-03	1.63E-03	2.50E-03	2.82E-03	2.11E-03	2.80E-03	1.66E-03	8.86E-03	5.97E-02	1.52E-01
1234																
1235																
1236	Listing	by	voxel	number:												
1237																
1238		Voxel	X	Center	Y	Center	Z	Center	Incident	Flux	Absorbed Flux		Absorbed/Vol			
1239		1	-1.46E+00	-1.46E+00	-1.21E+01	7.44E-03	2.06E-06	3.48E-04								
1240		2	-1.37E+00	-1.46E+00	-1.21E+01	8.24E-03	1.40E-06	2.36E-04								
1241		3	-1.29E+00	-1.46E+00	-1.21E+01	8.11E-03	1.79E-06	3.03E-04								
1242		4	-1.20E+00	-1.46E+00	-1.21E+01	6.73E-03	1.36E-06	2.30E-04								

1256	18	0.00E+00	-1.46E+00	-1.21E+01	8.33E-04	1.67E-05	2.83E-03
1257	19	8.57E-02	-1.46E+00	-1.21E+01	7.48E-04	1.58E-05	2.67E-03
1258	20	1.71E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	4.80E-04	1.40E-05	2.36E-03
1259	21	2.57E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	4.54E-04	6.00E-06	1.01E-03
1260	22	3.43E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	3.19E-04	4.43E-06	7.47E-04
1261	23	4.29E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	7.00E-04	4.72E-06	7.96E-04
1262	24	5.14E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	7.02E-04	3.03E-07	5.11E-05
1263	25	6.00E-01	-1.46E+00	-1.21E+01	2.07E-04	1.21E-09	2.04E-07

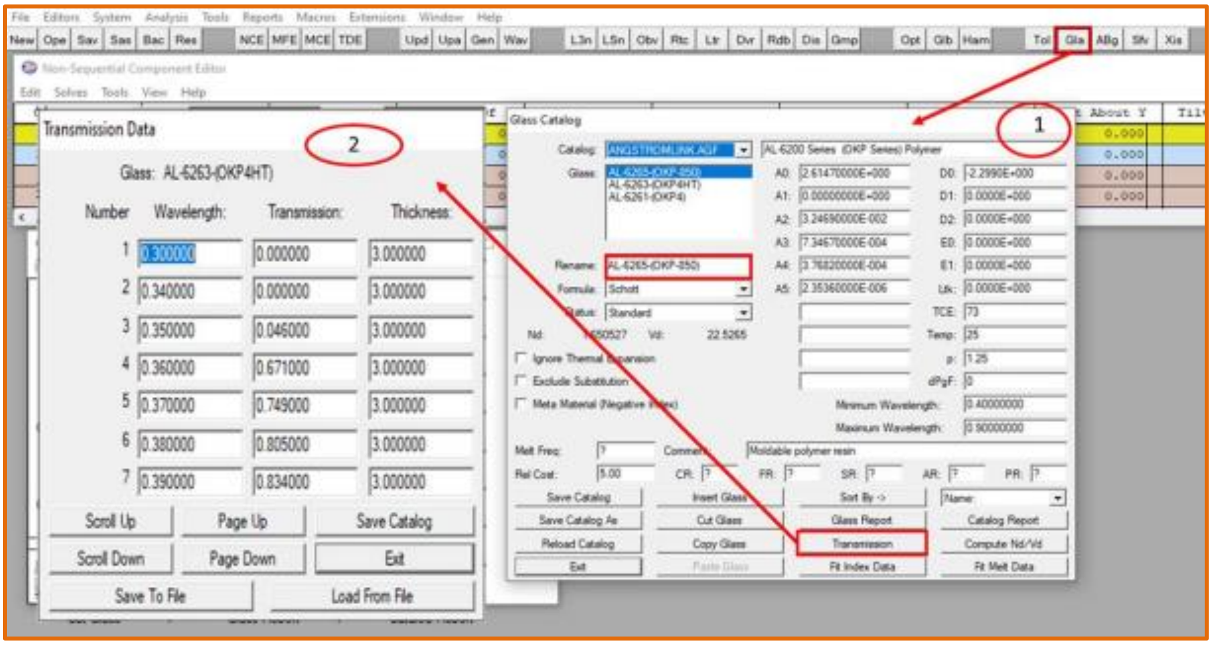
الشكل(III-15): شكل Excel.

يتم اتباع نفس الخطوات والمراحل في باقي الاوساط الفعالة في التجربة : (Ce: Cr :Nd:YAG) ، (Ce:Nd:YAG) (Cr:Nd:YAG)

نتائج المحاكاة العددية:لـ Cr:Nd:YAG:

يتيح برنامج Zemax طرق لإدماج خصائص الوسط الفعال الجديد – في هذه الحالة (Cr:Nd:YAG) وحساب الاستطاعة الممتصة من طرفه حيث نجد:

الطريقة الاولى: ويتم فيها إدراج الأطوال الموجية الممتصة من قبل المادة الجديدة وذلك بالنقرعلى تعليمة Gla داخل برنامج Zemax وإدراج مادة جديدة وتحديد جميع خصائصها، كما توضحه الصورة التالية :



الشكل(III-16): الأطوال الموجية الممتصة من قبل المادة الجديدة.

الطريقة الثانية: يتم فيها حساب الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال وذلك باستعمال النسب المحسنة للتداخل لطيف الامتصاص للوسط الفعال المستخدم مع طيف الانبعاث الشمسي وذلك بإدراج هذه النسبة في معادلة حساب طاقة المنبع ثم تحميلها في خانة الطاقة وإكمال باقي المراحل للحصول علي الاستطاعة الممتصة.

تمَّ إختيار الطريقة الثانية، وذلك لسهولة استخدامها وتوفر معلوماتها تحت نفس الشروط للمادة الأولية قبل التطعيم ، وسيتم العمل بها في جميع اوساط المادة الفعالة المستخدمة

❖ قياس نسبة الاستطاعةعندالبؤرة (كاشف واحد) الوسط (Cr:Nd:YAG)

نستعمل اشعاعا شمسيا ساقطا علي سطح الارض قيمته $950\ W/m^2$ [7] [8] ، وعدسة فرنيل بنصف قطر قدره$R=0.45m$ ومساحة قدرها $0.635m^2$ وذلك لحساب استطاعة المنبع كالتالي:

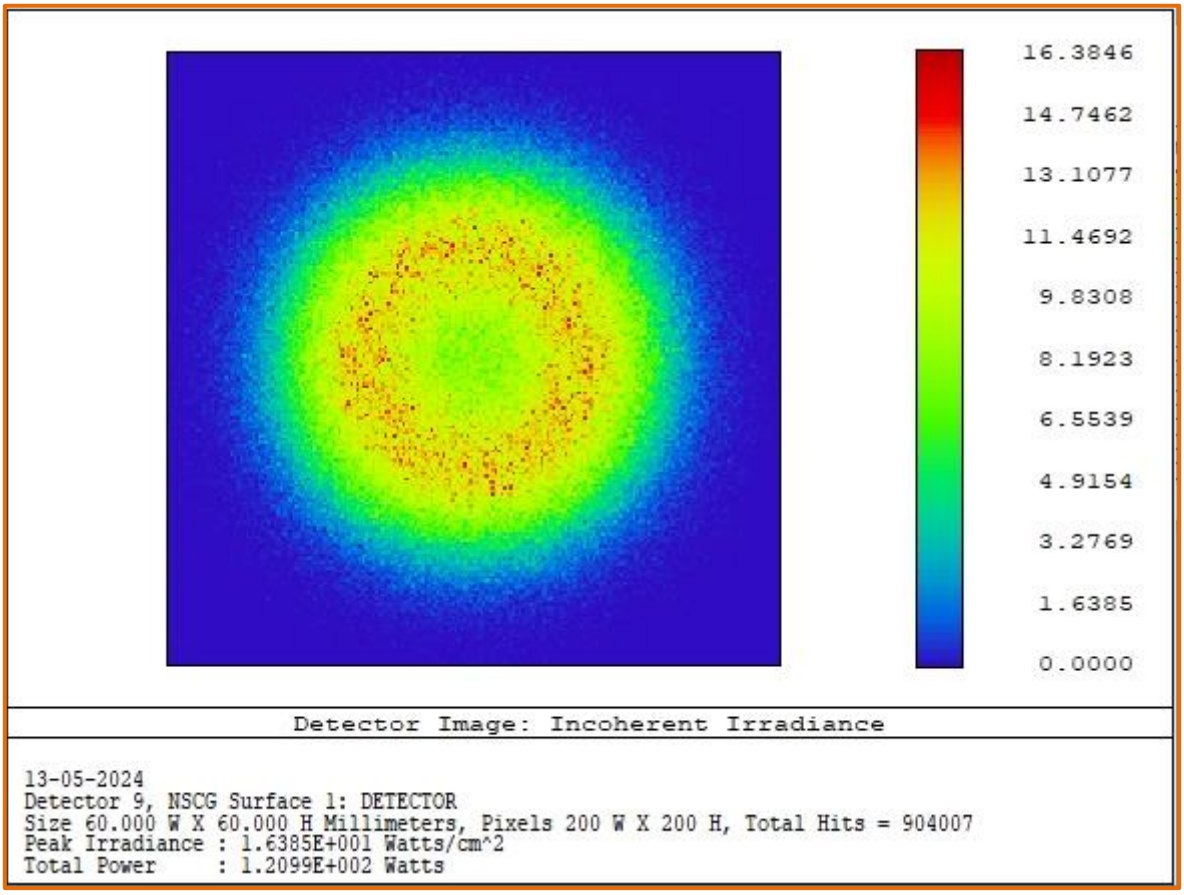
$$950 \times 0.24 \times \pi \times R^2 = 144.97W$$

(2-III)

R: نصف قطر عدسة فرنيل

24% نسبة تطابق طيف الامتصاص لـCr :Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي [8]

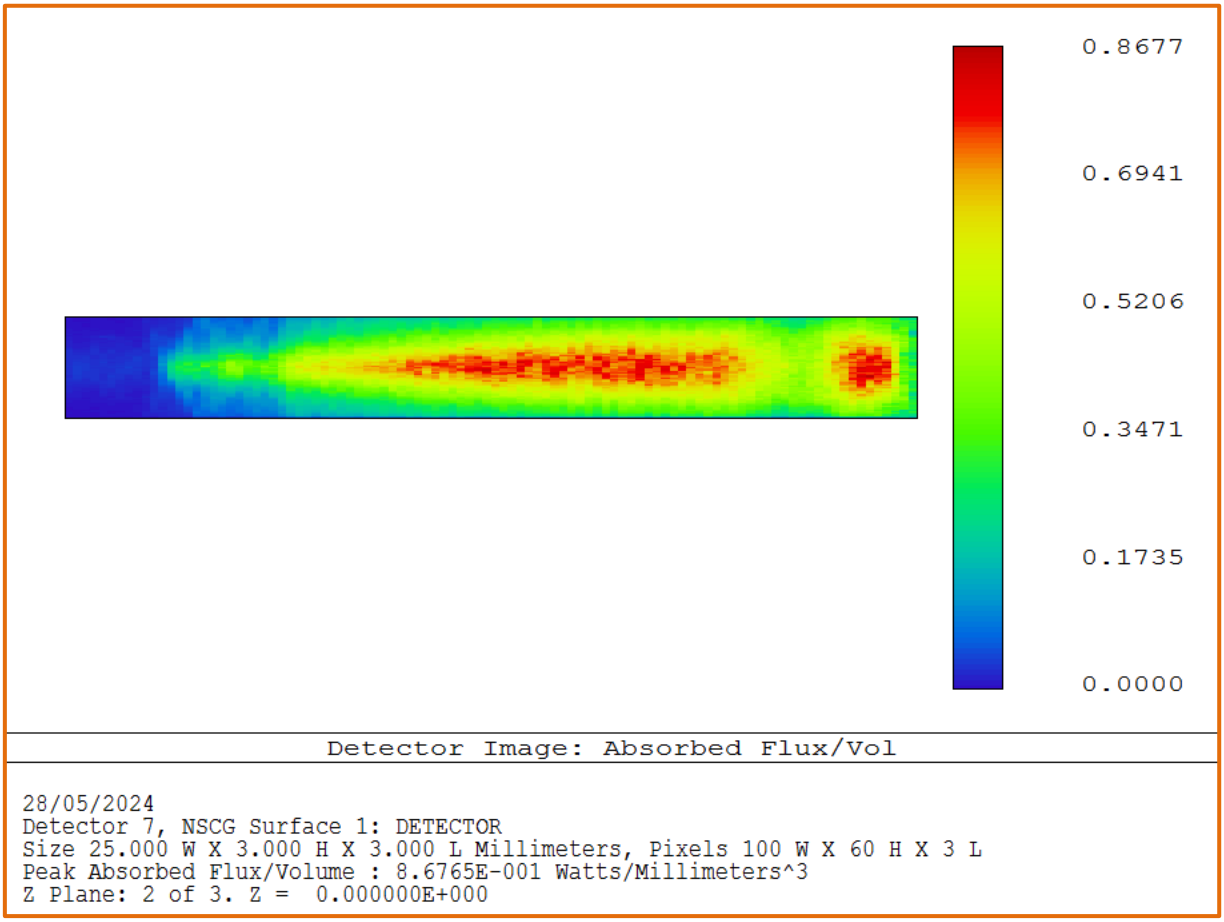
يمكن الكاشف الضوئي الموجود داخل بؤرة العدسة من قياس نسبة الطاقة الشمسية المركزة داخل هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها وذلك بوضعه في المكان المناسب . الاستطاعة المركزة المقاسة تساوي w 120.99 بتوزيع غوصي كما تظهره الصور التالية:



الشكل(III-17): نسبة الاستطاعة المركزة عند البؤرة 120.99w.

❖ قياس نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال للكاشف الحجمي (Cr:Nd:YAG

❖ لقياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال Cr:Nd:YAG ومعرفة طريقة توزيعها ، نستعمل في هذه العملية الكاشف الحجمي والذي يستخم الفوكسيل (نقاط حجمية) كما توضحه الصورة :



الشكل(18-III): قياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعالCr:Nd:YAG .

- تخزن البيانات في الصورة على شكل نص في ملف يتم فتحه فيما بعد في صفحة في برنامج Excel. بعد ذلك نجمع قيم الاستطاعة الممتصة في جميع نقاط الوسط الفعال المقاسة بواسطة الكاشف الحجمي
- تم الحصول على استطاعة ممتصة مقدرة بـ 59.2w
- نلاحظ من خلال نتائج المحاكاة أن قيمة ونسبة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال لـ Nd:YAG عند تطعيمها بأيونات Cr^{3+} قد ارتفعت وتحسنت بقيمة معتبرة حيث :

(59.2÷39.7=1.5)

❖ قياس نسبة الاستطاعةعندالبؤرة (كاشف واحد) الوسط (Ce:Nd:YAG):

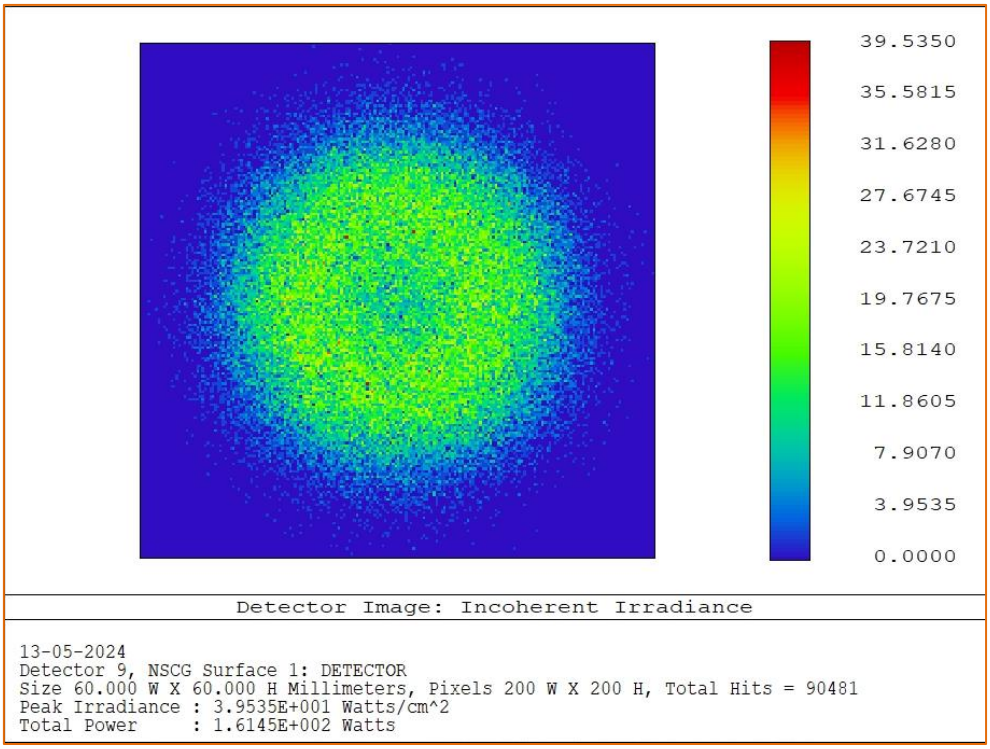
نستعمل إشعاعا شمسيا ساقطا على سطح الأرض قيمته $950\ W/m^2$ [7]، [8] ، وعدسة فرنيل بنصف قطر قدره$R=0.45m$ ومساحة قدرها $0.635m^2$ وذلك لحساب استطاعة المنبع كالتالي:

$$950 \times 0.32 \times \pi \times R^2 = 193.29W \qquad (3\text{-III})$$

R:نصف قطر عدسة فرنيل.

32% نسبة تطابق طيف الامتصاص لـ Ce:Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي.

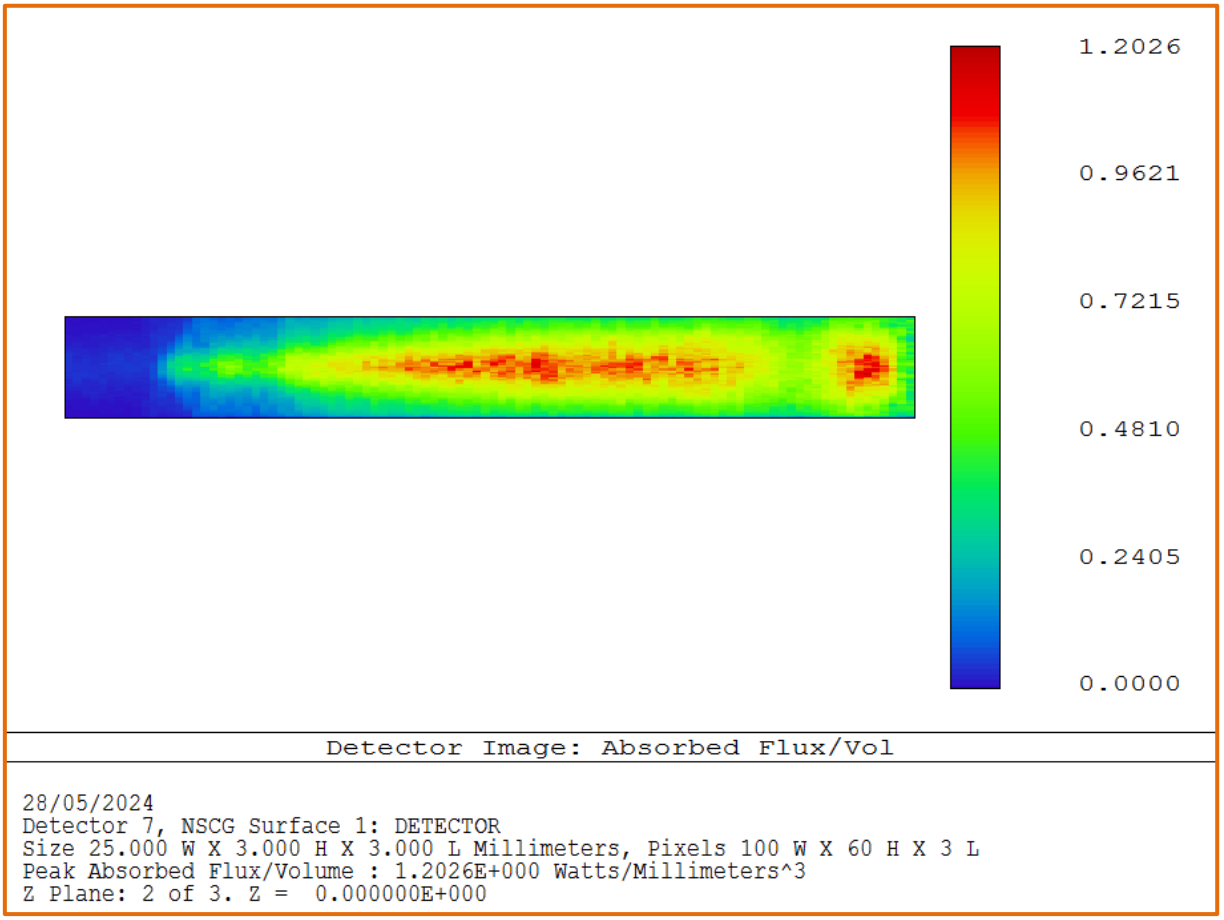
يمكّن الكاشف الضوئي الموجود داخل بؤرة العدسة من قياس نسبة الطاقة الشمسية المركزة داخل هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها وذلك بوضعه في المكان المناسب الاستطاعة المركزة المقاسة تساوي 161.45w بتوزيع غوصي كما تظهره الصور التالية:



الشكل(19-III): نسبة الاستطاعة المركزة عند البؤرة w 161.45.

❖ قياس نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال للكاشف الحجمي (Ce:Nd:YAG)

❖ لقياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال Ce:Nd:YAG ومعرفة طريقة توزيعها ، نستعمل في هذه العملية الكاشف الحجمي والذي يستخم الفوكسيل (نقاط حجمية) كما توضحه الصورة التالية :



الشكل(III-20): قياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال Ce:Nd:YAG.

تخزن البيانات في الصورة على شكل نص في ملف يتم فتحه فيما بعد في صفحة في برنامج Excel. بعد ذلك نجمع قيم الاستطاعة الممتصة في جميع نقاط الوسط الفعال المقاسة بواسطة الكاشف الحجمي

تم الحصول على استطاعة ممتصة مقدرة بـ 78.8w

نلاحظ من خلال نتائج المحاكاة أن قيمة ونسبة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال Nd: YAG عند تطعيمها بايونات ال Ce قد ارتفعت وتحسنت بقيمة معتبرة حيث :

(78.8w÷39.7w=1.98)

❖ قياس نسبة الاستطاعة عندالبؤرة (كاشف واحد) للوسط (Ce: Cr :Nd:YAG):

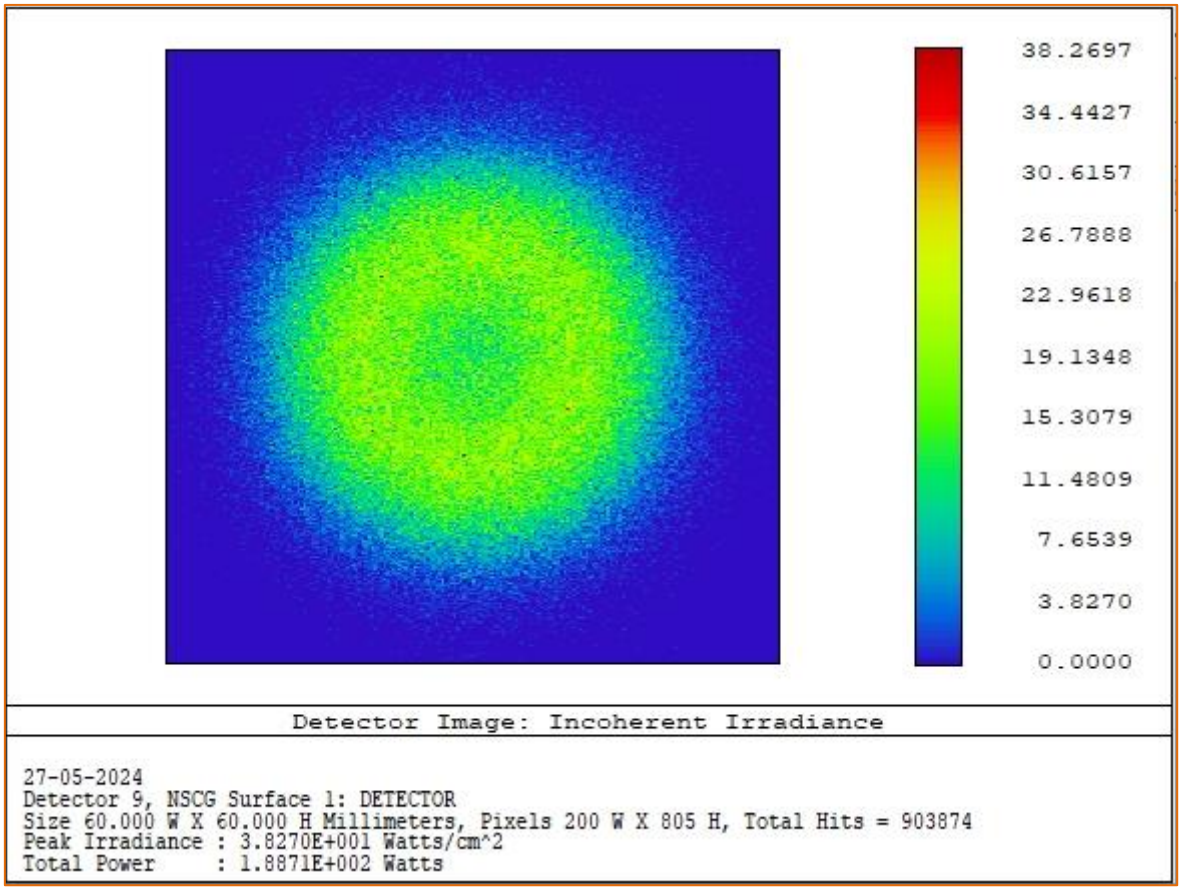
نستعمل إشعاعا شمسيا ساقطا على سطح الأرض قيمته $950\ W/m^2$ [7]،[8] ، وعدسة فرنيل بنصف قطر قدره R=0.45m ومساحة قدرها $0.635m^2$ وذلك لحساب استطاعة المنبع كالتالي:

$$950 \times 0.3744 \times \pi \times R^2 = 226.15W \qquad (4\text{-III})$$

R:نصف قطر عدسة فرنيل.

37.44% نسبة تطابق طيف الامتصاص لـ Ce: Cr :Nd:YAG مع طيف الانبعاث الشمسي.

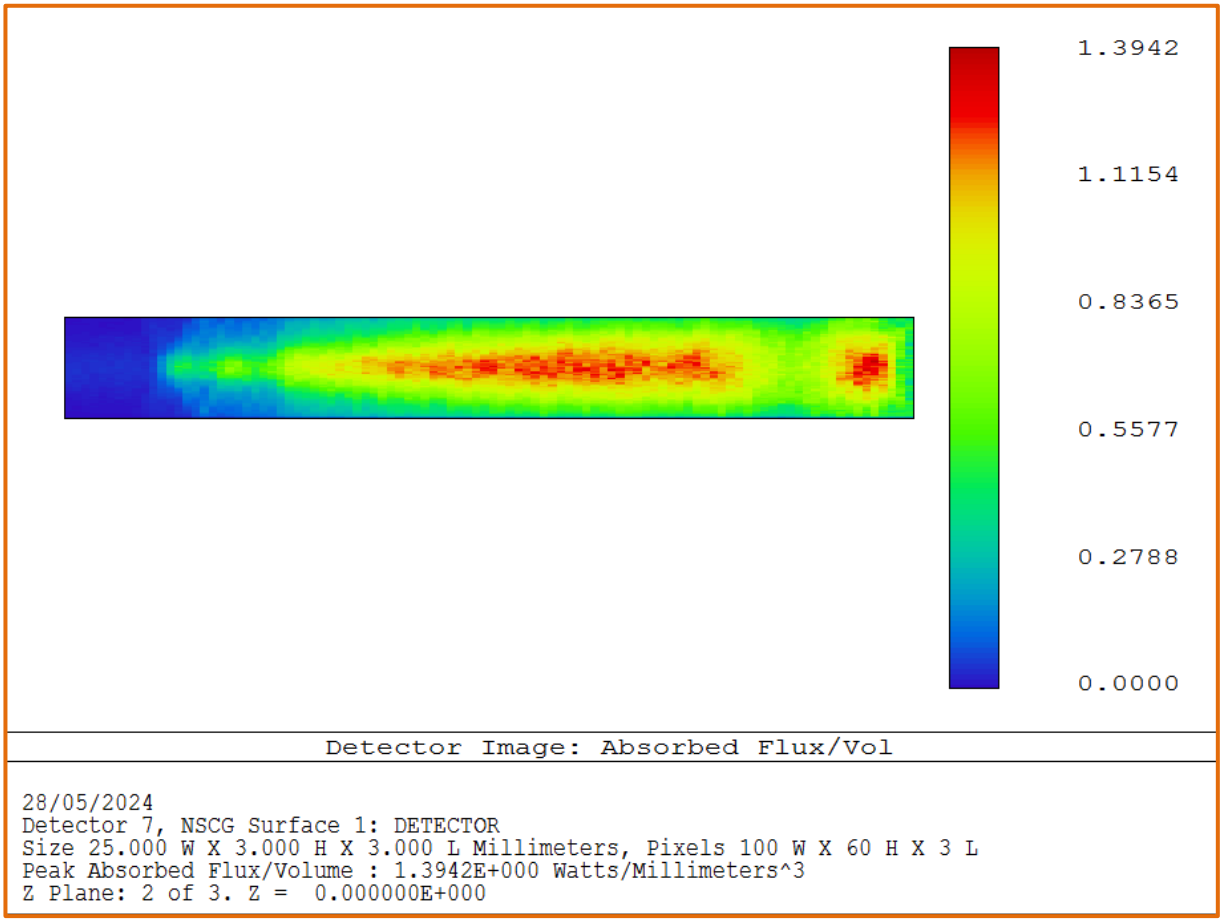
يمكن الكاشف الضوئي الموجود داخل بؤرة العدسة من قياس نسبة الطاقة الشمسية المركزة داخل هذه النقطة وكذلك تحديد توزيعها وذلك بوضعه في المكان المناسب، الاستطاعة المركزة المقاسة تساوي 188.71w بتوزيع غوصي كما تظهره الصور التالية



الشكل(III-21): نسبة الاستطاعة المركزة عند البؤرة 188.71w.

قياس نسبة الاستطاعة الضوئية حول الوسط الفعال الكاشف الحجمي(Ce: Cr :Nd:YAG)

لقياس استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعال Ce: Cr:Nd:YAG ومعرفة طريقة توزيعها، نستعمل في هذه العملية الكاشف الحجمي والذي يستخم الفوكسيل (نقاط حجمية) كما توضحه الصورة التالية :



الشكل(III-22): استطاعة الطاقة الممتصة من طرف الوسط الفعالYAG: Nd :Cr :Ce

تخزن البيانات في الصورة على شكل نص في ملف يتم فتحه فيما بعد في صفحة في برنامج Excel. بعد ذلك نجمع قيم الاستطاعة الممتصة في جميع نقاط الوسط الفعال المقاسة بواسطة الكاشف الحجمي، تم الحصول على استطاعة ممتصة مقدرة ب 92.3w.

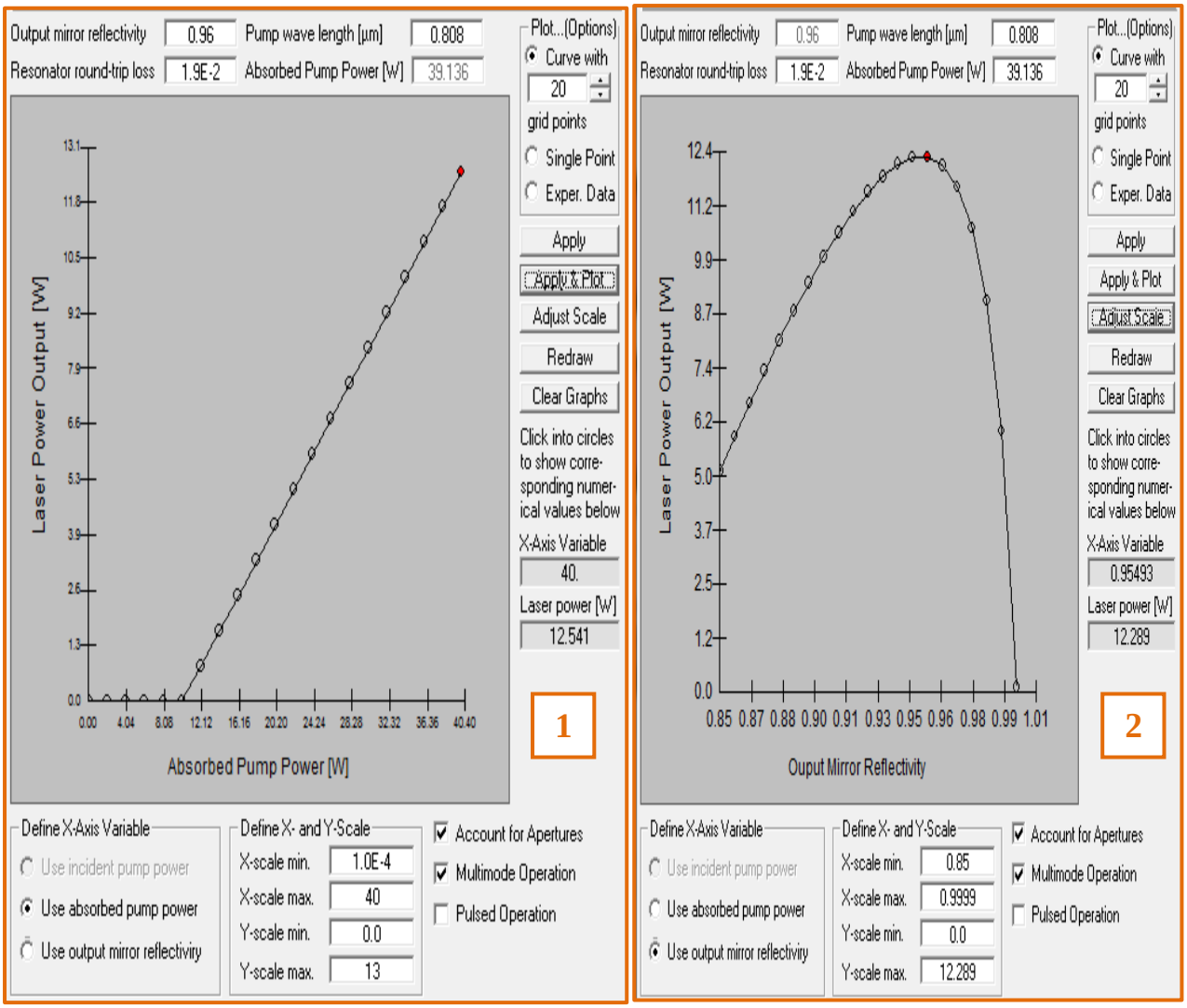
نلاحظ من خلال نتائج المحاكاة أن قيمة ونسبة الاستطاعة الممتصة من طرف الوسط الفعال لـ YAG: Nd عند تطعيمها بكل من أيونات Ce^{3+} و أيونات Cr^{3+} قد ارتفعت وتحسنت بقيمة معتبرة حيث :

(92.3w÷39.7w=2.23)

III-6- نتائج المحاكات العددية بواسطة برنامج LASCAD:

بالنسبة للوسط Nd:YAG:

تم بواسطة برنامج Zemax القيام بعملية محاكاة للمنظومة الليزرية وتحديد قيمة الامتصاص للأشعة من قبل الوسط الفعال Nd:YAG وذلك بمساعدة برنامج Excel، هذه النتائج يتم ترجمتها ومحاكاتها داخل برنامج LASCAD الذي يسمح بقياس استطاعة خرج الليزر(الليزر المنبعث) ، حيث بلغت قيمتها 12.541w بالنسبة للوسط الفعال Nd:YAG كما يوضحه الشكل التالي :



الشكل(III-23):1/طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعالNd:YAG بواسطة برنامج LASCAD. **2/**طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD.

تم الحصول على هذه النتائج بالاستعانة ببرنامج LASCAD حيث :

- يبين الشكل 1 تزايد في طاقة انبعاث الليزر بزيادة الطاقة الممتصة خلال عملية الضخ .
- استطاعة عتبة الضخ المسجلة تساوي 9.4w، وذلك من أجل معامل انعكاسية للمراة الأمامية يساوي 96% والأبعاد التالية للوسط الليزري L=25mm R= 1.5mm

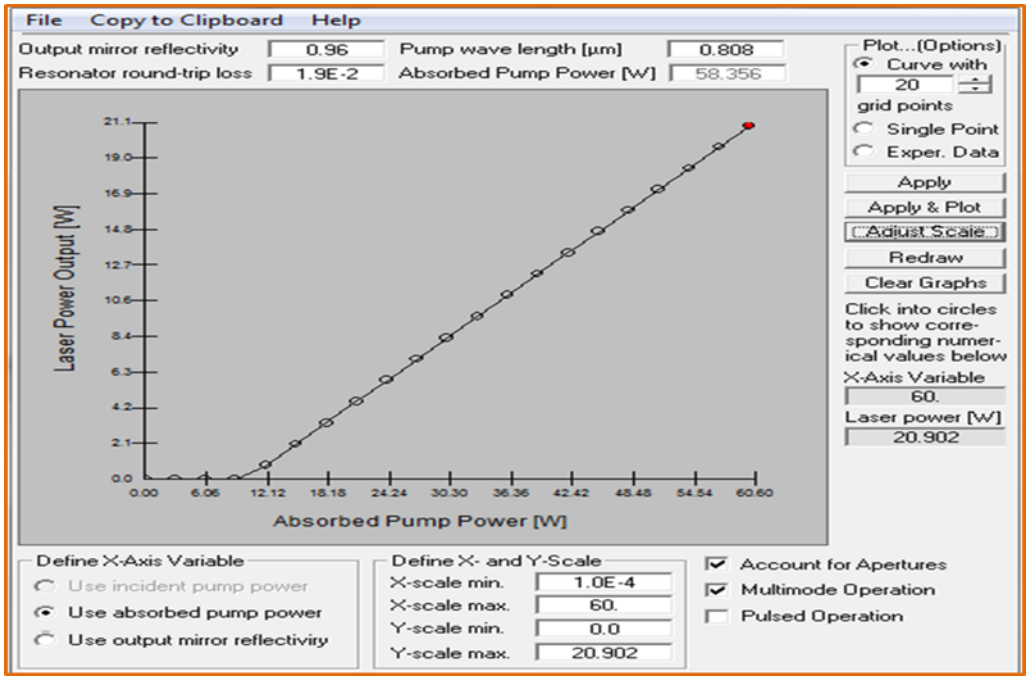
R= نصف قطر الوسط الفعال ، L = طول الوسط الفعال

- كفاءة الانحدار(slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعال إلى ليزر شمسي والتي تمثل ميل منحني الشكل 1 هي :
- (tan α=12.541÷(40-9.4)=(0.4098.
- من الشكل 2 نلاحظ :أن التناسب يكون طرديا أي أن الزيادة في قيمة انعكاسية المراة يرفقها زيادة في استطاعة الليزر الخارج وذلك حتى بلوغ القيمة 95.8%، حيث تؤثربعدها الزيادة سلبا على طاقة خراج

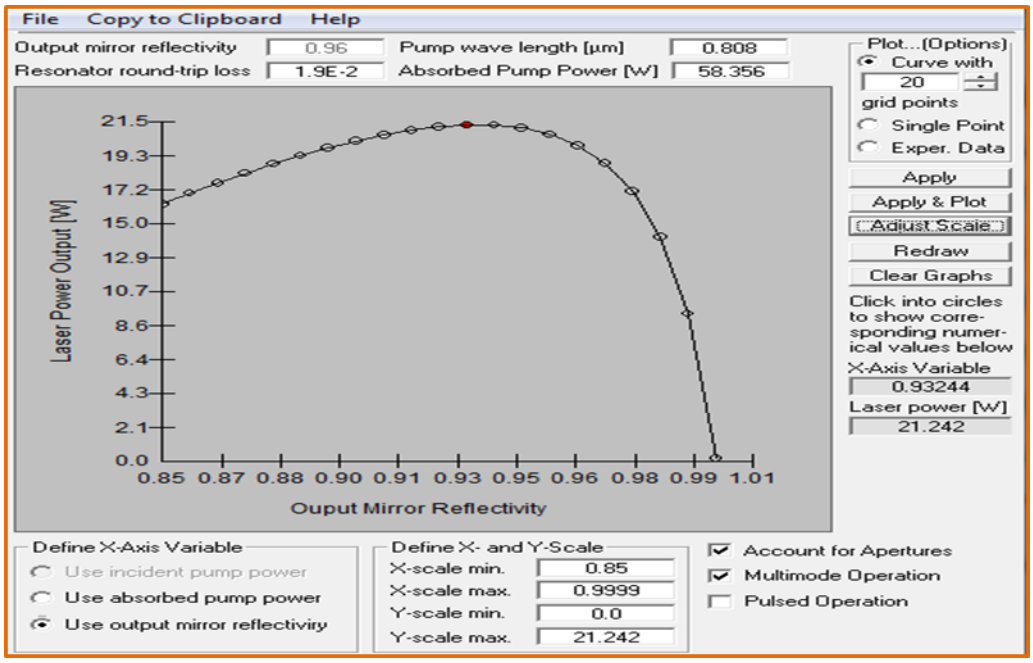
الليزر حيث يتم تحفيز وجود انتقالات غير مشعة على حساب الانقالات المشعة فيها، وبالتالي يساهم في تسخين أكثر للوسط الفعال .

بالنسبة للوسط الفعال (Cr :Nd:YAG):

تم بواسطة برنامج Zemax القيام بعملية محاكاة للمنظومة الليزرية وتحديد قيمة الامتصاص للأشعة من قبل الوسط الفعال Nd:YAG:Cr وذلك بمساعدة برنامج Excel ، هذه النتائج يتم ترجمتها ومحاكاتها داخل برنامج LASCAD الذي يسمح بقياس استطاعة خراج الليزر (الليزر المنبعث) ، حيث بلغت قيمتها 20.902 W بالنسبة للوسط الفعال Nd:YAG:Cr كما يوضحه الشكل التالي:



الشكل(III-24): طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعالCr:Nd:YAG بواسطة برنامج LASCAD.



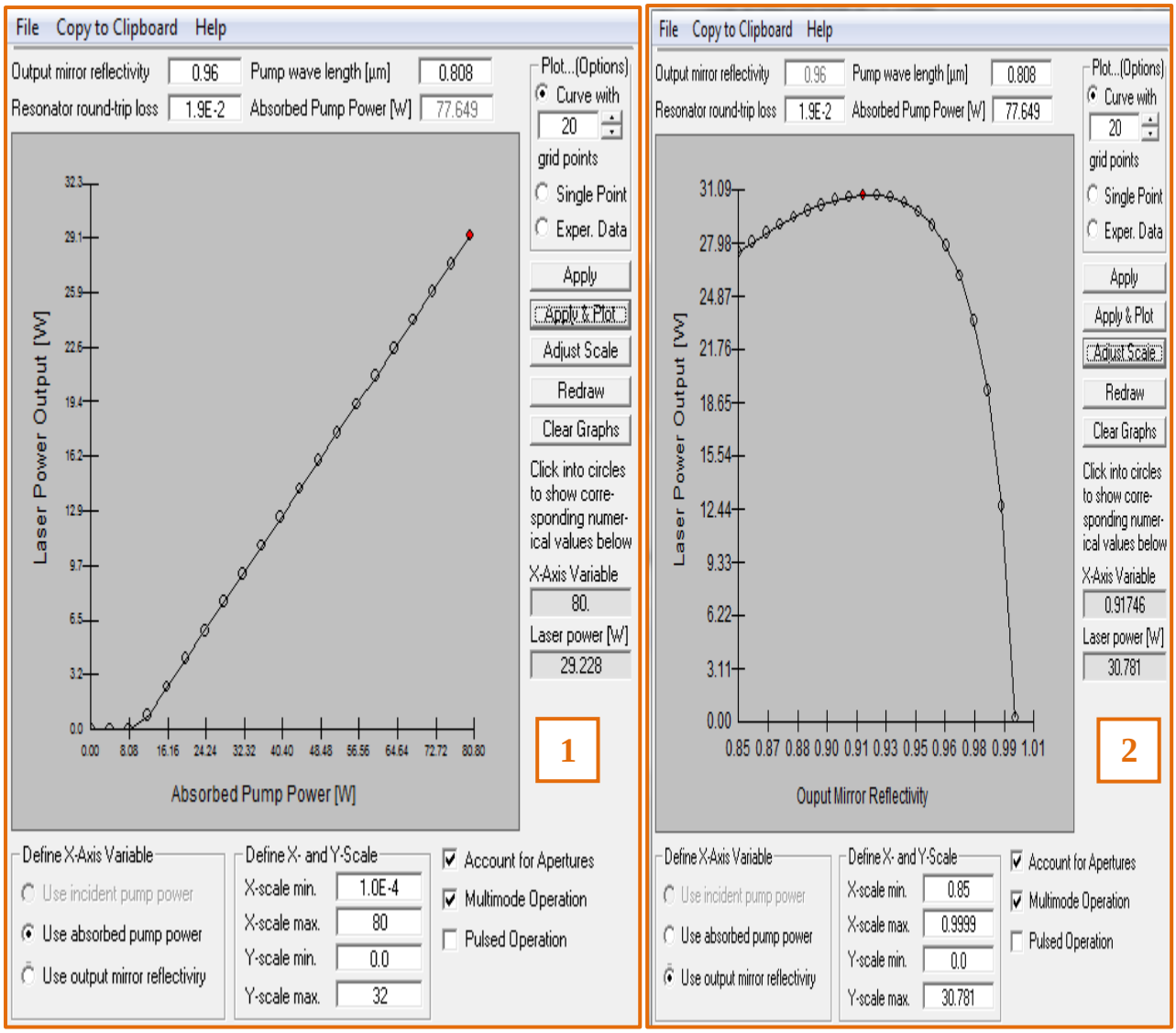
الشكل(III-25): طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD.

تم الحصول على هذه النتائج بالاستعانة ببرنامج LASCAD حيث :

- يبين الشكل 1 تزايد في طاقة انبعاث الليزر بزيادة الطاقة الممتصة خلال عملية الضخ
- استطاعة عتبة الضخ المسجلة تساوي9.7w، وذلك من أجل معامل انعكاسية للمراة الامامية يساوي %96
- كفاءة الانحدار(slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعال Cr: Nd:YAG إلى ليزرشمسي والتي تمثل ميل منحنى الشكل2 هي
- .(tan α=20.902÷(60-9.7)=(0.4155)
- من الشكل 2 نلاحظ : التناسب يكون طرديا أي أن الزيادة في قيمة انعكاسية المراة يرفقها زيادة في استطاعة الليزر الخارج وذلك حتى بلوغ الفيمة 93.8%، حيث تؤثربعدها الزيادة سلبا على طاقة خراج الليزر حيث يتم تحفيز وجود انتقالات غير مشعة على حساب الانتقالات المشعة فيها، وبالتالي يساهم في تسخين أكثر للوسط الفعال .

بالنسبة للوسط الفعال(Nd:YAG :Ce):

تم بواسطة برنامج Zemax. القيام بعملية محاكاة للمنظومة الليزرية وتحديد قيمة الامتصاص للأشعة من قبل الوسط الفعال Nd:YAG:Ceوذلك بمساعدة برنامج ال Excel ، هذه النتائج يتم ترجمتها ومحاكاتها داخل برنامج LASCAD الذي يسمح بقياس استطاعة خراج الليزر (الليزر المنبعث) ، حيث بلغت قيمتها 29.228w بالنسبة للوسط الفعال Nd:YAG: Ce كما يوضحه الشكل التالي :



الشكل(III- 26): 1/طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعالCe:Nd:YAG بواسطة برنامج LASCAD. **2/**طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD.

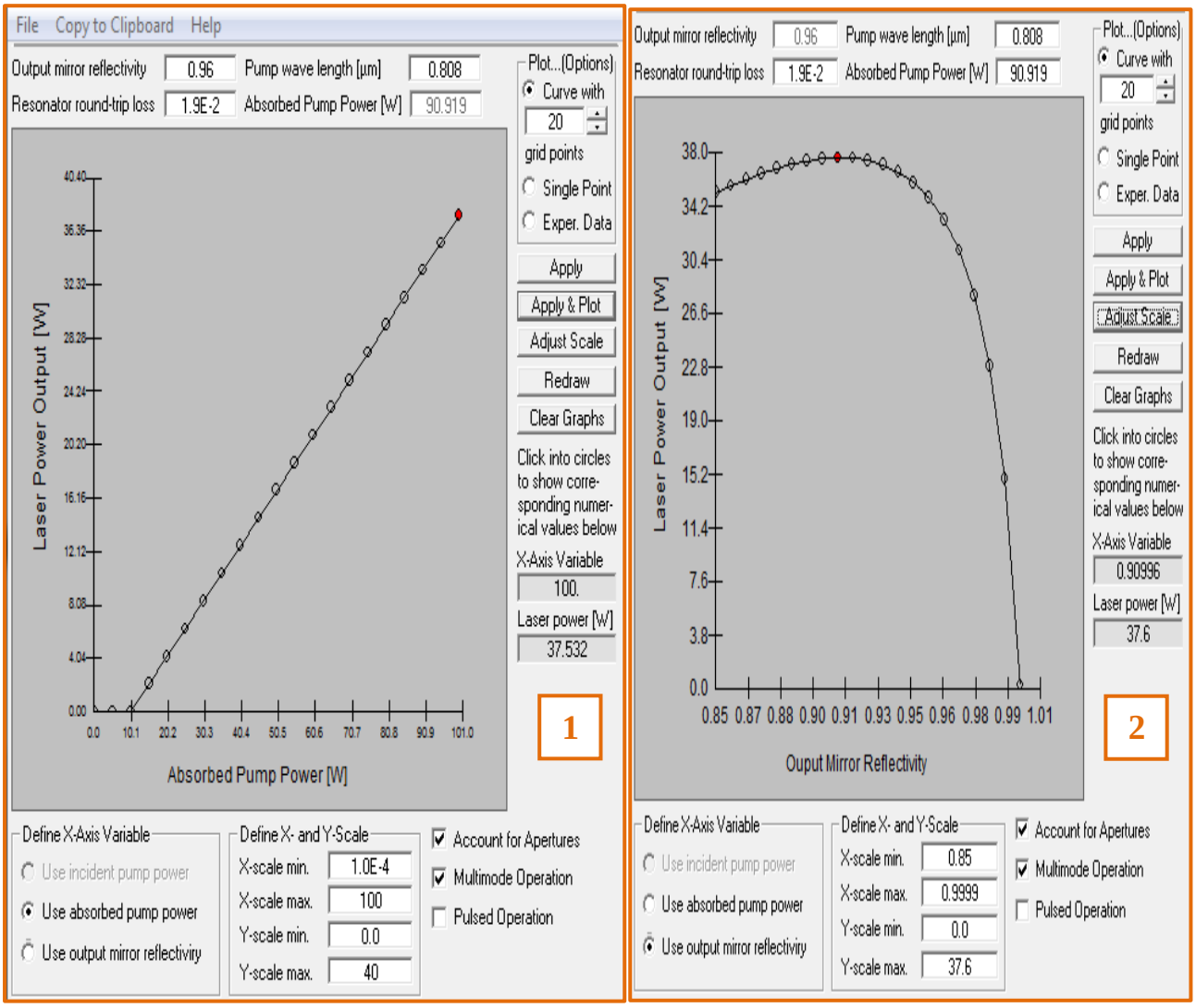
تم الحصول علي هذه النتائج بالاستعانة ببرنامج LASCAD حيث :

- يبين الشكل 1 تزايد في طاقة انبعاث الليزر بزيادة الطاقة الممتصة خلال عملية الضخ.
- استطاعةعتبة الضخ المسجلة تساوي8.9w ، وذلك من أجل معامل انعكاسية للمراة الامامية يساو96 %
- كفاءة الانحدار(slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعالNd:YAG:Ce إلى ليزر شمسي والتي تمثل ميل منحني الشكل2 هي:
- .(tan α=29.228÷(80-8.9)=(0.4110

من الشكل 2 نلاحظ : أن التناسب يكون طرديا أي أن الزيادة في قيمة انعكاسية المراة يرفقها زيادة في استطاعة الليزر الخارج وذلك حتى بلوغ القيمة 91.6%، حيث تؤثربعدها الزيادة سلباعلى طاقة خراج الليزر حيث يتم تحفيز وجود انتقالات غير مشعة على حساب الانتقالات المشعة فيها، وبالتالي يساهم في تسخين أكثر للوسط الفعال.

بالنسبة للوسط الفعال (Ce: Cr :Nd:YAG):

تم بواسطة برنامج Zemax. القيام بعملية محاكاة للمنظومة الليزرية وتحديد قيمة الامتصاص للأشعة من قبل الوسط الفعال Ce:Cr :Nd:YAG وذلك بمساعدة برنامج Excel ، هذه النتائج يتم ترجمتها ومحاكاتها داخل برنامج LASCAD الذي يسمح بقياس استطاعة خراج الليزر (الليزر المنبعث) ، حيث بلغت قيمتها 37.532w بالنسبة للوسط الفعال Ce:Cr :Nd:YAG كما يوضحه الشكل التالي :



الشكل(III-27): 1/طاقة الليزر المنبعث بدلالة طاقة الضخ الممتصة للوسط الفعال Ce: Cr:Nd:YAG. بواسطة برنامج LASCAD. **2/**طاقة الليزر المنبعثة بدلالة انعكاسية المراة بواسطة برنامج LASCAD.

تم الحصول على هذه النتائج بالاستعانة ببرنامج LASCAD حيث :

- يبين الشكل 1 تزايد في طاقة انبعاث الليزر بزيادة الطاقة الممتصة خلال عملية الضخ.
- استطاعة عتبة الضخ المسجلة تساوي10.2w، وذلك من أجل معامل انعكاسية للمراة الأمامية يساوي % 96

- كفاءة الانحدار(slope efficiency) لتحويل استطاعة الضخ الممتصة من طرف الوسط الفعالNd:YAG:Cr إلى ليزر شمسي والتي تمثل ميل منحني الشكل2 هي :
- .(tan α=37.532÷(100-10.2)=(0.4179)

من الشكل 2 نلاحظ : أن التناسب يكون طرديا أي أن الزيادة في قيمة انعكاسية المراة يرفقها زيادة في استطاعة الليزر الخارج وذلك حتى بلوغ الفيمة 90.8%، حيث تؤثربعدها الزيادة سلبا على طاقة خراج الليزر حيث يتم تحفيز وجود انتقالات غير مشعة على حساب الانتقالات المشعة فيها ، وبالتالي يساهم في تسخين اكثر للوسط الفعال.

❖ مناقشة النتائج :

تم حساب استطاعة منبع قدرها 97w وذلك لمنظومة الليزر الشمسي ذي الوسط الفعال (Nd:YAG) وذلك باستعمال عدسة فرنيل بمساحة قدرها $0.635m^2$ تستقبل إشعاعا شمسيا ساقطا تبلغ شدته $950\ w/m^2$ [7] [8] حيث نكتب المعادلة :

$$950 \times 0.16 \times \pi \times R^2 = 97W$$

وذلك بالأخذ بعين الاعتبار نسبة التطابق لطيف الامتصاص لمادة النيوديوم مع طيف الانبعاث الشمسي والتي قدرت بـ 16%.

تمت بعدها عملية المحاكاة العددية للمنظومة الليزرية بواسطة برنامج Zemaxو LASCAD حيث يقيس الكاشف الأول الموضوع في بؤرة عدسة فرينيل قيمة الاستطاعة الضوئية عندها حيث قدرت بـ 81.15w بتوزيع غوصي كما يظهره الشكل و بنسبة ضياعات عند البؤرة قدرت ب8.36 % الناتجة عن نوع وتركيز العدسة المستخدمة .

تم وضع كاشف سطحي ثان عند مخرج الدليل الموجي المسؤول علي توجيه و نقل الأضواء المركزة حيث وجد أن الاستطاعة المسجلة عند مخرج الدليل الموجي قدرت بـ 78.23w بتوزيع غوصي كما يظهره الشكل أي بضياعات قدرها 3.6% بسبب الامتصاص داخل الدليل الموجي المستخدم .

الاستطاعة الضوئية الممتصة من طرف الوسط الفعال (Nd:YAG) قدرت بـ $39.7w/m^3$

حيث تم وضع كاشفين حجميين (طولي وعرضي) حول هذا الوسط لحساب الاستطاعة الممتصة في كل نقطة حجمية من نقاطه ومعرفة توزيعها كما يبينه الشكل ويتم تحويل القيم في هذه النقاط إلى نص عددي وذلك لعدم امكانية إخراج قيمة الاستطاعة الممتصة الكلية مباشرة ، تتم الاستعانة ببرنامج Excel والذي يسمح بحساب قيمة الاستطاعة الكلية الممتصة للوسط وذلك بجمع جميع قيم الاستطاعة المسجلة من طرف الكاشف قصد العمل على تحسين نسبة الاستطاعة الكلية الممتصة وبالتالي الانبعاث الليزر الناتج يتم اللجوء إلى تقنيات التطعيم المختلفة للوسط الفعال(Nd:YAG) حيث يتم تطعيمه أولا بأيونات الكروم الثلاثي ثم أيونات السيريوم الثلاثي ثم التطعيم المضاعف بكليهما للوسط الفعال (Nd:YAG).

أسفرت عملية التطعيم على الحصول على أوساط فعالة جديدة ذات خصائص محسنة تمت دراستها تحت نفس الشروط المستخدمة في الوسط الأول.

تم حساب استطاعة المنبع للأوساط الفعالة التالية (Nd:YAG :Cr)(Nd:YAG :Ce) (Ce Cr:Nd:YAG) وذلك باعتبار نسب التداخل والتطابق الجديدة والمحسنة مع طيف الانبعاث الشمسي علي التوالي لكل وسط 24% ، 32% ، 37.44% فتم تحصيل القيم التالية:

- (Nd:YAG :Cr) باستطاعة منبع قدرها : 144.78w.
- (Nd:YAG :Ce) باستطاعة منبع قدرها : 193.04w.
- (Nd:YAG :Ce: Cr) باستطاعة منبع قدرها : 226.15w.

بنفس الخطوات السابقة والتي تم استخدامها في محاكاة الوسط (Nd:YAG) تم الحصول على قيم الاستطاعة الممتصة في كل وسط ونسبة الضياعات في كل منظومة كما يلي :

- (Nd:YAG)الاستطاعة الكلية الممتصة $39.7w/m^3$.
- (Nd:YAG :Cr)الاستطاعة الكلية الممتصة $59.2w/m^3$.
- (Nd:YAG :Ce) الاستطاعة الكلية الممتصة $78.8\ w/m^3$.
- (Nd:YAG :Ce: Cr) الاستطاعة الكلية الممتصة $92.3w/m^3$.

تمت عمليات التحسين المتوالية في قيم الاستطاعة الكلية الممتصة من طرف الأوساط المحسنة عبر التطعيم حيث ارتفعت قيم الاستطاعة الكلية الممتصة 1.5 مرة عند التطعيم بأيونات الكروم، وبقيمة 1.98 مرة عند التطعيم بأيونات السيريوم ، كما ارتفعت قيمة الاستطاعة الكلية الممتصة إلى2.32 مرة (أي أكثر من الضعف) عند التطعيم المضاعف بكل من الكروم والسيريوم عند الوسط (Nd:YAG :Ce: Cr)

استخدم فيما بعد برنامج LASCAD لحساب الاستطاعة الليزرية الخارجة (المنبعثة) في كل وسط وذلك بعد ضبط الأبعاد بين الوسط الفعال والمرنان وعملية ضبط نظام المرايا (قيمة الانعكاسية المناسبة للمرآة الأمامية 0.96%) فتحصلنا على نسب الاستطاعة الليزرية المنبعثة التالية في كل وسط :

- (Nd:YAG) الاستطاعة الليزرية المنبعثة قدرت بـ 12.541w.
- (Nd:YAG :Cr) الاستطاعة الليزرية المنبعثة قدرت بـ 20.902w.
- (Nd:YAG :Ce) الاستطاعة الليزرية المنبعثة قدرت بـ 29.228w.
- (Nd:YAG :Ce: Cr) الاستطاعة الليزرية المنبعثة قدرت بـ 37.532w.

أي بعدة تحسينات معتبرة حيث:

الوسط (Nd:YAG) الاستطاعة الليزرية المنبعثة قدرة بالنسبة 12.541w ، عند التطعيم بأيونات الكروم ترتفع النسبة إلى 20.902w أي بزيادة قدرها 1.66 مرة (20.902÷12.541) ، وعند التطعيم بأيونات السيريوم ترتفع نسبة الاستطاعة الليزرية المنبعثة إلى 29.228w أي بزيادة قدرها 2.33 مرة (29.228÷12.541)، وعند القيام بعملية التطعيم المضاعف للوسط (Nd:YAG) بكل من أيونات الكروم و السيريوم بلغت الاستطاعة الليزرية قيمة كبيرة قدرها 37.532w أي بزيادة قدرها

2.99=(37.532÷ 12.541) اي 3 مرات عن الوسط الأول المستخدم (Nd:YAG)

كما نميز عدة تحسينات في مقادير فزيائية مختلفة مثل كفاءة التجميع وكفاءة الميل أو الانحدار عبر الأوساط المختلفة كالتالي :

- (Nd:YAG) بكفاءة تجميع قدرها 19.74w=(0.635÷12.541) وكفاءة الميل أو الانحدار قدرها (tan α=0.4098) وبكفاءة تحويل شمسي- ليزري قدرها 31.5% = (39.7÷12.541).
- (Cr :Nd:YAG)بكفاءة تجميع قدرها32.91w=(0.635÷20.902) وكفاءة الميل او الانحدار قدرها (tan α=0.4155) وبكفاءة تحويل شمسي- ليزري قدرها35.30% =(59.2÷20.902).
- (Ce :Nd:YAG) بكفاءة تجميع قدرها 46.02w=(0.635÷29.228) وكفاءة الميل أو الانحدار قدرها (tan α=0.4110) وبكفاءة تحويل شمسي- ليزري قدرها 37.09% =(78.8÷29.228).
- (Ce: Cr :Nd:YAG) بكفاءة تجميع قدرها 59.10w=(0.635÷37.532) وكفاءة الميل أو الانحدار قدرها (tan α= 0.4179) وبكفاءة تحويل شمسي-ليزري قدرها40.66%=(92.3÷37.532).

وبالتالي تحسنت كفاءة التجميع عند إضافة أيونات الكروم بـ 1.66 مرة حيث (19.74w÷32.91) وبـ 2.33 مرة عند التطعيم بأيونات السيريوم (19.74w ÷ 46.02w) وبـ 3 مرة في الوسط أي عند عملية التطعيم المضاعف (19.74w÷59.10w).

III-7- خلاصة:

تم في هذا الفصل، القيام بعملية المحاكاة العددية بواسطة البرنامجينZemaxوLASCADللأوساط الليزرية الفعالة المختلفة(Nd:YAG)(Cr :Nd:YAG)(Ce: Nd:YAG)(Ce: Cr:Nd:YAG) بهدف تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي.

حيث تمت المقارنة بين مقادير استطاعات الامتصاص والانبعاث الليزري المختلفة لهذه الأوساط ورصد التطور في كفاءة التجميع و التحويل الليزري الشمسي وعدة مقادير أخرى مهمة.

أظهرت نتائج المحاكات العددية للمنظومة الليزرية التطور في مقدار الاستطاعة الممتصة من الوسط الفعال وكذا خراج الانبعاث الليزري عبر مختلف مراحل التطعيم حيث سجلنا استطاعة امتصاص محسنة بـ واستطاعة ليزرية منبعثة أكبر بـ 1.66 عند التطعيم بأيونات الكروم (Cr :Nd:YAG) ، وأكبر بـ 2.33 عند التطعيم بأيونات السيريوم (Ce :Nd:YAG)، وأكبر بثلاث مرات عند التطعيم بكلي الأيونين Cr^{3+} ، Ce^{3+} أي الوسط (Ce: Cr :Nd:YAG) وذلك تحت نفس الشروط .

وبالتالي تقنية التطعيم المضاعف بأيونات السيريوم والكروم للوسط الفعال تؤدي إلى تحسينات ممتازة ومعتبرة في كفاءة منظومة الليزر المضخ بالإشعاع الشمسي .

قائمة مراجع الفصل الثالث

قائمة المراجع العربية :

[1] نور الدين حمروني ،" ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين" ، أطروحة دكتوراه، جامعة لشهيد حمه لخضر الوادي،الجزائر ص ص105-109(2021).

قائمة المراجع الاجنبية:

[2] R.ZEMAX, "ZEMAXR user's manual,Radiant ZEMAX LLC (RZ),Kirkl,p805.(2011).

[3] S.Mehellou,"pompage optique des lasers par faisceau solaire."These de Doctorat, Universite Kasdi Merbah – Ouargla, Algerie,pp88-105.(2018).

[4] W .Koechner and M. Bass "Solid –State Lasers :A Graduate Text(Advenced Texts in Physics)."Springer Science Business Media,USA p409 (2006.(

[5] K.Altmann,"LASCADTM –The Laser Engineering Tool. LAS-CAD GmbH." Techhnical report, Munich, Germany, p 46(2016)

[6] A.G.Fox and T.Li,"Resonant modes in a maser interferometer,"Bell Syst. Tech. j. ,vol. 40, no.2,pp.453-488(1961).

[7] W .Koechner and M. Bass "Solid –State Lasers :A Graduate Text(Advenced Texts in Physics)."Springer Science Business Media,USA p399 (2006).

[8] Dawei Liang.Joana Almeida.Claudia.Vistas.Bruno Tubircio.Dario Garcia"Solar-Pumped Lasers with examples of numerical Analysis of solid –state Lasers"pp81-166(2023).

[9] W. T. Silfvast, "Laser fundamentals.", Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 642 (2004).

الخاتمة العامة

خاتمة عامة

يتميز الشعاع الليزري بعدة خصائص ممتازة (من ترابط وتماسك في شعاعه ونسبة سطوع عالية) تجعل منه عنصرا مهما وفعالا في مجموعة واسعة من المجالات والتطبيقات الطبية والعسكرية وفي مجالات الاتصالات الحديثة .

يتم الحصول على أشعة الليزر بعدة طرق مختلفة حسب نوع الوسط الفعال المولد لهذه الاشعة وطرق ضخه ، ومن أبرز هذه الليزرات نميز ليزر SPL أو الليزر المضخ بواسطة الإشعاع الشمسي ، والذي يتم إنتاجه من خلال تركيز الأشعة الشمسية وتوجيهها نحو الوسط الفعال للحصول على الفعل الليزري .

يعتبر الوسط الفعال (Nd:YAG) أو عقيق الألمنيوم والايتريوم المطعم بواسطة أيونات النيوديوم Nd من أبرز الأوساط الفعالة الصلبة وأكثرها استخداما وذلك لخصائصه الفزيائية والحرارية الممتازة ، إلا أنه يبرزمدى تطابق وتداخل لطيف امتصاصه مع طيف شعاع الانبعاث الشمسي الوارد ضعيف نسبيا 16% أي حوالي 84% من الطاقة الشمسية الواردة غير مستغلة وبالتالي نسبة ضياعات جد كبيرة .

تم العمل على تحسين نسبة التطابق هذه بين طيف امتصاص الوسط الفعال للإشعاع الشمسي وطيف إشعاع الانبعاث الوارد ، وبالتالي تحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي وذلك عبر عدة عمليات تطعيم مختلفة للوسط الفعال(Nd:YAG) بعدة أيونات ، حيث تم التطعيم أولا بواسطة أيونات الكروم للوسط (Nd:YAG) ثم التطعيم بأيونات السيريوم للوسط (Nd:YAG) ثم القيام بعملية التطعيم المضتعف بكل من الأيونين الكروم والسيريوم

تمت بعدها عملية المحاكاة العددية بواسطة البرنامجين Zemax وLASCAD لدراسة أداء منظومة الليزر الشمسي في الأوساط الفعالة الأربعة (Nd:YAG)، (Cr :Nd:YAG)، (Ce :Nd:YAG)، (Ce: Cr :Nd:YAG)

يبين الجدول التالي أهم النتائج المتحصل عليها :

الوسط	(Nd:YAG)	(Cr:Nd:YAG)	(Ce:Nd:YAG)	Ce: Cr (:Nd:YAG)
الاستطاعة الممتصة	39.7w/m3	59.2w/m^3	78.8 w/m^3	92.3w/m^3
استطاعة الليزر الناتج	12.541w	w20.902	w29.228	37.532w
كفاءة التحويل الشمسي –ليزري	%31.5	%35.30	%37.09	%40.66
كفاءة الانحدار	(tan=0.4098)	(tan α=0.4155)	(tan α=0.4110)	(tan α= 0.4179)
كفاءة التجميع	19.74w	32.91w	46.02w	59.10w

التطور في قيمة الاستطاعة الممتصة	/	1.5 مرة	1.98 مرة	2.23 مرة
التطور في قيمة الاستطاعة النبعثة لليزر	/	1.66 مرة	2.33 مرة	3 مرة
التطور في قيمة كفاءة التجميع	/	1.66 مرة	2.33 مرة	3 مرة

من خلال النتائج المتحصل عليها نستنتج أن القيام بعملية التطعيم بكل من أيونات السيريوم والكروم عبر مختلف الأوساط والمراحل أدى إلى تحسينات كبيرة ومعتبرة في جميع المتغيرات المدروسة ، حيث ارتفعت قيمة الاستطاعة الممتصة بـ 1.5 مرة عند التطعيم بالكروم ، 1.98 مرة عند التطعيم بأيونات السيريوم ، و ب2.32 مرة عند التطعيم بكليهما ، بينما ارتفعت قيمة استطاعة الانبعاث وكفاءة التجميع بقيمة 1.66 مرة عن الوسط الأول (Nd:YAG) عند التطعيم بأيونات الكروم ، وبـ 2.33 مرة عند التطعيم بأيونات السيريوم ، كما تضاعفت قيمة الاستطاعة في الانبعاث الليزري وكذا كفاءة التجميع بثلاث مرات كاملة في الوسط (Ce: Cr :Nd:YAG) المطعم بكلي الأيونين الكروم والسيريوم.

كخلاصة للنتائج المتحصل عليها بواسطة عملية المحاكاة العددية ، نستنتج بأن عملية التطعيم المضاعف بأيونات الكروم أوالسيريوم للوسط ، وعملية التطعيم المضاعف بكلي الأيونين معا للوسط (Nd:YAG) تعد تقنيات ممتازة لتحسين كفاءة منظومة الليزر الشمسي ورفع جودته بزيادة استطاعة وقوة الليزر الناتج وبالتالي تطوير منظومات ليزر شمسي ذات قدرات عالية وبكفاءة ليزرية أكبر تستغل في عدة ميادين ومجالات مختلفة.

بالرغم من كل التحسينات والزيادات في مردودية الليزر الشمسي وارتفاع كفاءته والنتائج المحققة أعلاه (تضاعف استطاعة خراج الليزر بحوالي 3 مرات)، لا تزال هناك حاجة ملحة لإجراء المزيد من الأبحاث و التجارب للعمل على تحسين هذه المنظومة ولتحسين فهمنا لعمليات التطعيم المختلفة في الأوساط الصلبة وآثارها على منظومة الليزر الشمسي ، والمواصلة في عمليات البحث والتجريب في هذا المجال يؤدي إلى فتح أبواب جديدة في تقنيات التطعيم المضاعف بمختلف العناصر وتوسيع نطاقات تطبيقاتها المحتملة ، وبالتالي رفع كفاءة الليزر الناتج ومردوده الطاقوي ، حيث نقترح عدة أفكار وخطوات قد تسهم في تحسين منظومة الليزر الشمسي منها :

تجريب مواد جديدة لها خصائص أخرى وبنسب تطابق مرتفعة مع طيف الانبعاث الشمسي ومقاومية جيدة للحرارة مما يؤدي إلى استغلال أكثر للطاقة الشمسية وبالتالي مردود ليزري عال .

تحسين وتعديل نسب التطعيم واختيار العناصر المضافة والأيونات المطعمة التي توفر الظروف الأكثر مثالية للإنتاج الليزري .

بحمد الله

الملخص

تعتبر منظومة الليزر الشمسي من أبرز الأنظمة الليزرية المستخدمة والتي تعمل علي استغلال الطاقة الشمسية المركزة في تحفيز الوسط الليزري الفعال، والعمل على تحسين مردودية الإشعاع الليزري الناتج يكون بعدة طرق مختلفة، والتي من أبرزها تحسين كفاءة الوسط الفعال المستخدم وتطوير خصائصه.

تم في هذه المذكرة دراسة الأداء للوسط الفعال (Nd:YAG) الأكثر استخداما وشيوعا وذي نسبة التطابق المنخفضة نسبيا مع طيف الانبعاث الشمسي% 16 وكذلك دراسة الأداء للأوساط المطعمة والمحسنة التالية والناتجة انطلاقا من الوسط الاول:(Nd:YAG)، (Cr :Nd:YAG) (Ce:Nd:YAG)، (Ce:Cr:Nd:YAG)

بينت نتائج المحاكاة والنمذجة العددية بواسط برنامجي Zemaxو LASCAD أن عمليات التطعيم المضاعف بواسطة أيونات السيريوم والكروم على حدا، والتطعيم المضاعف بكليهما في المرحلة النهائية أي الوسط (Ce: Cr :Nd:YAG) أدى إلى تحسينات ممتازة وجد معتبرة في خصائص الأوساط الفعالة الناتجة ، وبالتالي خصائص المنظومة الليزرية والمردود الليزري الناتج

بالمقارنة مع المنظومة الليزرية التقليدية للوسط الاول (Nd:YAG) وتحت نفس الشروط المطبقة في الدراسة تم الحصول علي استطاعة امتصاص أكبر بـ 1.5 مرة عند التطعيم بالكروم، وبمقدار 1.98 مرة أكبر عند التطعيم بالسيريوم، وبقيمة 2.32 مرة أكبر عند التطعيم بكليهما، كما سجلنا ارتفاع كبير في قيمة الاستطاعة للانبعاث الليزري الناتج وكذا كفاءة التجميع، حيث ارتفعت قيمة الخراج الليزري بـ 1.66 مرة عند التطعيم بالكروم ، وبمقدار 2.33 مرة عند التطعيم بأيونات السيريوم، كما تضاعفت قيمة خراج الانبعاث الليزري وكذا كفاءة التجميع بمعدل ثلاث مرات مقارنة بالوسط الاول Nd:YAG))، أي بتحسينات ممتازة وجدّ معتبرة لمردود المنظومة الليزرية.

الكلمات المفتاحية: Ce: Cr , ((Nd:YAG)) , Ce :Nd:YAG)) , Cr :Nd:YAG)) , ((Nd:YAG:)) ، الليزر الشمسي، الوسط الفعال، نسبة التطابق، طيف الانبعاث الشمسي، التطعيم المضاعف، استطاعة الانبعاث الليزري.

Abstract

(Nd:YAG), Cr:Nd: YAG) ,Ce::Nd:YAG), (Ce:Cr:Nd:YAG) :

ions separately, and doubling doubling with both in the final stage, i.e. the medium (Ce:Cr:Nd:YAG), led to excellent and significant improvements in the properties of the resulting active media, and thus the properties of The laser system and the resulting laser yield

Compared to the traditional laser system for the first medium (Nd:YAG), and under the same conditions applied in the study, an absorption capacity of 1.5 times greater was obtained when grafting with chromium, 1.98 times greater when grafting with cerium, and 2.32 times greater when grafting with both.

We also recorded a significant increase in the power value of the resulting laser emission as well as the collection efficiency, as the value of the laser emission increased by 1.66 times when doping with chromium, and by 2.33 times when doping with cerium ions. The value of the laser emission output as well as the collection efficiency doubled by a rate of three times compared to the first medium, Nd. (YAG), that is, with excellent and significant improvements to the laser system's efficiencyThe results of simulation and numerical modeling using the Zemax and LASCAD programs showed that the processes of double doping with cerium and chromium The solar laser system is considered one of the most prominent laser systems used, which works to exploit concentrated solar energy to stimulate the effective laser medium, and working to improve the yield of the resulting laser radiation is done in several different ways, the most prominent of which is improving the efficiency of the active medium used and developing its properties.

In this memorandum, the performance of the active medium (Nd:YAG), which is the most commonly used and widely used and has a relatively low match rate with the solar emission spectrum of 16%, was studied, as well as the performance of the following grafted and improved media produced from the first medium.

Keywords: (Nd:YAG), (Cr :Nd:YAG), (Ce :Nd:YAG), Ce:(Cr :Nd:YAG) (Solar laser, Active medium,Matching ratio, Solar emission spectrum, double dopping, Laser emission power.