الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

دكتوراه ل. م. د

فرع: الفيزياء

التخصص: اشعاع و مادة و طاقة

من اعداد:

الطالب: نور الدين حمروني

تحت عنوان:

ضخ الليزر الشمسي من كلا الطرفين

Pompage des lasers solaires par les deux extrémités

نوقشت يوم: **07/ 12/ 2021**

أمام لجنة المناقشة المكونة من الاساتذة:

الحبيب القدة	استاذ: جامعة الوادي	رئيسا
رحومة فرحات	استاذ: جامعة الوادي	مشرفا و مقررا
السعيد محلو	استاذ محاضر "أ": جامعة الوادي	مشرفا مساعدا
محمد الصادق محبوب	استاذ: جامعة الوادي	ممتحنا
عز الدين بقاص	استاذ محاضر "أ": جامعة الوادي	ممتحنا
عمر بن طويلة	استاذ محاضر "أ": جامعة ورقلة	ممتحنا

- انجز هذا العمل في مخبر استغلال و تثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES) بجامعة الوادي وبمشاركة مخبر الليزر الشمسي بجامعة لشبونة الجديدة.

الإهداء

الحمد لله و الشكر على كل خير أوصلني إياها، وصلى الله وسلم وبارك على عبده ورسوله نبينا محمد وعلى آله وأصحابه أجمعين. اهدي هذا العمل:

إلى الشمعة التي اضاءت ليل الحياة، أمي الغالية

إلى الذي لم يدخر جهدا من اجل ان نحيا في عزة وسعادة أبي العزيز.

إلى رفيقة دربي، التي وقفت الى جنبي دوما، رغم المشقة و العناء، زوجتي الغالية.

إلى رياحيني و بهجتي في الحياة، بناتي أميمة و جمانة وليان.

إلى اخوتي و اخواتي اللذين لم يدخروا جهدا في تشجيعي و حثي على متابعة دراستي، وكل ابنائهم و زوجاتهم.

إلى كل من علمني حرفا، أساتذتي و معلمي و اهل الفضل علي.

إلى كل من يفكر ويبحث للارتقاء بالعلم في كل مكان.

إلى كل هؤلاء اهديهم هذا العمل، سائلا الله العلي القدير ان ينفعنا به و يمدنا بتوفيقه.

نور الدين حمروني

شكر و عرفان

هذه الأطروحة هي نتيجة اربع سنوات من البحث الذي تم إجراؤه في مخبر استغلال و تثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES) بجامعة الوادي، و بمساهمة مخبر الليزر الشمسي بجامعة لشبونة الجديدة البرتغال.

بادئ ذي بدء، أود أن أتقدم بجزيل الشكر و العرفان الى الاستاذ الدكتور فرحات رحومة استاذ بجامعة الوادي و مدير مخبر استغلال و تثمين المصادر الطاقوية الصحراوية (LEVRES) الذي تفضل بالمشاركة في الإشراف على هذا البحث، فطالما قدم لي النصح والإرشاد وعمل جاهدا على تذليل جميع الصعوبات والمعيقات من اجل إتمام هذا العمل، فلك يا من كان لك السبق في ركب العلم و التعليم اهدي اسمى عبارات الشكر والتقدير التي تليق بك.

كما ادين بالشكر الكبير و عميق المحبة و التقدير الى الدكتور السعيد محلو استاذ محاضر "أ" بجامعة الوادي و الذي تفضل بالمساعدة على الاشراف على هذا البحث، و اتاح لي فرصة الاحتكاك به عن قرب، فعرفته عالما حليما صادقا، مرافقا مقوما و موجها خلال كل مراحل هذا البحث، يقف لساني عاجزا على قول أي شيء، فعبارات الشكر قليلة، وكلمات الثناء لا تستطيع أن تفيك حق، فلك جزيل الشكر و صادق العرفان.

كما اتوجه بأسمى عبارات الشكر والعرفان الى الاستاذ الدكتور داوي ليانغ (Dawei Liang) استاذ مشارك بقسم الفيزياء جامعة لشبونة الجديدة، و الدكتورة جوانا الميدا (Joana Almeida) بقسم الفيزياء جامعة لشبونة الجديدة على مساعدتهما لي في إنجاز عملية المحاكاة و كذلك على كل توجيهاتهما الدقيقة و ملاحظاتهما القيمة و على حفاوة استقبالنا في مخبر الليزر الشمسي.

أتوجه بخالص شكري إلى أعضاء لجنة المناقشة: إلى الاستاذ الدكتور الحبيب قدة استاذ بجامعة الوادي الذي شرفني بقبول ترأس لجنة المناقشة، وكذلك الاستاذ الدكتور محمد الصادق محبوب استاذ بجامعة الوادي و الدكتور عز الدين بقاص استاذ محاضر "أ" بجامعة الوادي و الدكتور عمر بن طويلة استاذ محاضر "أ" بجامعة ورقلة، على منحهم هذا العمل جزء من اوقاتهم الثمينة من اجل اخراجه في احسن صورة ممكنة.

الشكر و العرفان موصول ايضا الى السيد احمد الشين مدير متوسطة الشهيد العقون محمد الكبير بالطيبات على تفهمه لظروف دراستي و على كل ما قدمه لي من مساعدة ادارية و تسهيلات.

الشكر و العرفان موصول ايضا الى السيد العايش حمروني استاذ اللغة العربية على ما بذله من مجهود و مساعدة في التصحيح اللغوي لهذه الاطروحة.

الفهرس

المحتوى	الصفحة
الاهداءات	I
التشكرات	II
الفهرس	III
قائمة الجداول	IX
قائمة الصور	X
قائمة الرموز	XVII
قائمة المصطلحات	XIX
الملخص	XXIII
مقدمة عامة	01
الفصل الاول: مبادئ الليزر	
1. مقدمة	05
2. طبيعة الضوء	05
2.2 النظرية الجسيمية (Particle Theory)	05
3.2 النظرية الموجية (Wave Theory)	05
4.2 النظرية الكهراطيسية (Electromagnetism Theory)	06
5.2 نظرية تكميم الضوء (Light Quantization Theory)	06
3. المصادر الكلاسيكية (الحرارية) للضوء	07
1.3 الاجسام السوداء	07
2.3 مصادر الخط (Line Sources)	09
3.3 الثنائيات الباعثة للضوء (LED)	10
4. خواص الضوء الصادر من المنابع الكلاسيكية (غير الليزرية)	12
5. الليزرات (Lasers)	13
1.5 تعريف الليزر	13
6. إحصائية بولتزمان (Boltzmann's Statistics)	14
7. تفاعل الضوء مع المادة ومعاملات أينشتاين(Einstein Coefficient)	16
1.7 امتصاص الاشعاع (Absorption)	16
2.7 الاصدار التلقائي (Spontaneous emission)	17
3.7 الاصدار المتحرض (Stimulated emission)	18
4.7 العلاقة بين المعاملات (A, B_{12}, B_{21})	19
8 مبدأ الليزر و تضخيم الإشعاع	21
1.8 تضخيم الضوء	21

2.8 المضخم البصري..... 22
3.8 الانقلاب الاسكاني(Population Inversion)..... 24
4.8 شرط العتبة (Threshold condition)..... 24
5.8 عملية الضخ..... 25
1.5.8 ليزر السويات الثلاث..... 26
2.5.8 ليزر السويات الأربعة..... 26
6.8 معادلات المعدلات الزمنية: (Rate Equations)..... 27
1.6.8 معادلات المعدلات الزمنية ليزر الثلاثة مستويات..... 27
2.6.8 معادلات المعدلات الزمنية لليزر الاربعة مستويات..... 29
9. ظروف التشغيل الزمنية المختلفة..... 30
1.9 تبديل عامل النوعية (Q-switched Laser)..... 31
2.9 طريقة تثبيت النمط (Mode-Locked)..... 33
3.9 أوضاع التشغيل الأخرى (الضخ النبضي)..... 34
10. تصاميم المرنانة..... 34
1.10 مرايا ذات انحناء متساوٍ..... 37
2.10 مرنانة مستوية- مقعرة..... 38
3.10 مرنانة مقعرة – محدبة..... 38
4.10 المرنانة المستوية – المتوازية..... 38
5.10 الأنماط المحورية (Axial Modes)..... 39
6.10 الأنماط العرضية (Transverse Modes)..... 41
11. خصائص الحزمة الغاوسية (Gaussian Beam)..... 42
12. خصائص حزمة أشعة الليزر (Properties of laser beams)..... 44
1.12 أحادية اللون (Monochromaticity)..... 45
2.12 الترابط (Coherence)..... 45
3.12 الاتجاهية (Directionality)..... 45
4.12 السطوع (Brightness)..... 46
13. ليزرات الحالة الصلبة المعروفة..... 46
1.13 ليزرات الياقوت (The ruby laser) 47
2.13 ليزرات النيوديميوم (Neodymium Lasers)..... 48
1.2.13 الخصائص الليزرية للـ Nd:YAG..... 49
14. تطبيقات الليزر..... 50
1.14 الليزر في الصناعة..... 50
2.14 الليزر في الاتصالات..... 51
3.14 الليزر في البحث والطب..... 51
4.14 الليزر في الرسومات ومحلات البقالة..... 52

5.14 التطبيقات العسكرية لليزر..... 52
15. الخلاصة..... 53

الفصل الثاني: الشمس مصدر الضوء

1. مقدمة..... 54
2. طبيعة الإشعاع الشمسي..... 54
1.2 طبقة الفوتوسفير أو الكرة الضوئية (Photosphere)..... 54
2.2 طبقة الكروموسفير أو الكرة اللونية (Chromosphere)..... 55
3.2 الاكليل (Corona)..... 55
3. المعاملات الاساسية للشمس..... 56
1.3 المسافة..... 56
2.3 الكتلة..... 57
3.3 نصف القطر..... 57
4.3 قدرة الانبعاث..... 57
5.3 درجة حرارة السطح..... 58
4. الطيف الكهرومغناطيسي..... 58
5. الاشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكتلة هواء 1.5..... 61
6. حركة الأرض (Motion of earth)..... 63
1.6 الثابت الشمسي Solar Constant..... 64
2.6 زوايا الأرض - الشمس الأساسية Sun-earth angles..... 64
1.2.6 زاوية خط العرض (α) Latitude angle..... 65
2.2.6 زاوية الوقت الشمسي (h) Solar time angle..... 65
3.2.6 زاوية الانحراف أو زاوية ميل الشمس (d) Declination angle..... 66
4.2.6 زاوية الارتفاع الشمسي(β)..... 67
5.2.6 زاوية السمت (γ) azimuth angle..... 67
3.6 الوقت الشمسي (Solar time)..... 68
7. الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي..... 69
8. الأشعة الشمسية المباشرة و المنتشرة Beam and diffused radiation..... 70
1.8 نموذج أشري..... 72
2.8 نموذج هوتيل..... 72
9. قياس الإشعاع الشمسي..... 73
10. المركزات الشمسية..... 74
1.10 مقدمة..... 74
2.10 تصاميم المركزات..... 75
3.10 تصنيف المركزات الضوئية..... 77
4.10 أنواع المركزات الضوئية..... 77

5.10 تعريفات..... 78
1.5.10 الفتحة (W)..... 78
2.5.10 معدل التركيز (C)..... 78
3.5.10 معدل تركيز السطح (C_{area})..... 79
4.5.10 معدل تركيز التدفق الضوئي (C_{flux})..... 79
5.5.10 زاوية القبول ($2\theta_a$)..... 79
6.5.10 عامل الاعتراض (γ)..... 80
7.5.10 معدل زاوية السقوط (K)..... 80
6.10 طرق تصنيف المركزات..... 83
1.6.10 عامل الاعتراض..... 85
2.6.10 معدلات زاوية السقوط..... 85
11. أنواع المركزات (concentrator types)..... 86
1.11 عاكسات القطع المكافئ (Parabolic reflectors)..... 86
2.11 عدسات و مرايا فرينل..... 89
1.2.11 تاريخ عدسات فرينل (History of Fresnel Lenses)..... 90
2.2.11 التطبيقات النموذجية لعدسات فرينل..... 93
3.11 المخاريط..... 93
4.11 المركز المركب المكافئ (CPC) the Compound Parabolic Concentrator..... 94
1.4.11 هندسة (CPC)..... 94
2.4.11 التوجيه والطاقة الممتصة لمركز CPC..... 98
3.4.11 الكفاءة البصرية لمركز CPC..... 100
12. الخلاصة..... 100

الفصل الثالث: الليزر الشمسي دراسة نظرية و نبذة تاريخية

1. مقدمة..... 103
2. تطبيقات الليزر الشمسي..... 103
3. اسس تقنية الليزر الشمسي..... 104
1.3 منظومة التركيز الاولية (Primary stage concentrator)..... 104
2.3 منظومة التركيز الثانية (Second-stage concentrator)..... 105
3.3 منظومة التبريد (Cooling system)..... 105
4.3 منظومة التتبع الشمسية (Solar tracking system)..... 106
5.3 الوسط الليزري (المادة الفعالة)..... 106
6.3 مرنانة الليزر او التجويف الليزري..... 107
4. طرق ضخ الليزر الشمسي..... 107
1.4 الضخ غير المباشر..... 107
2.4 الضخ المباشر..... 108

3.4 مقارنة بين طرق ضخ الليزر الشمسي..... 108
4.4 طرق الضخ المباشر لليزر الشمسي..... 109
1.4.4 الضخ الطرفي..... 109
2.4.4 الضخ الجانبي..... 109
5. اهم التطورات التاريخية لليزر الشمسي (STATE-OF-THE-ART)..... 110
6. مقارنة بين الضخ الطرفي و الضخ الجانبي المباشرين..... 129
7. الخلاصة..... 131

الفصل الرابع: الليزر الشمسي محاكاة، نتائج و مناقشة

1. مقدمة..... 133
2. الهدف من المشروع..... 133
1.2 الاشكالية..... 133
2.2 هدف البحث..... 133
3.2 اهمية البحث..... 134
3. المنظومة المقترحة..... 134
1.3 اختيار المركز الاولي..... 134
2.3 اختيار المركز الثاني..... 135
3.3 اختيار الوسط الفعال..... 135
4. المحاكاة العددية..... 136
1.4 برنامج ZEMAX© تصميم منظومة الليزر الشمسي..... 136
1.1.4 المصادر(Sources)..... 137
2.1.4 العناصر البصرية الهندسية (geometric optical elements)..... 137
3.1.4 كائنات الكاشفات (detectors)..... 138
4.1.4 تحليل طاقة الضخ الممتصة..... 138
2.4 LASCAD© - محاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي..... 139
1.2.4 تحليل العنصر المتناهية (FEA) للتأثيرات الحرارية..... 139
2.2.4 طريقة المصفوفة الغاوسية ABCD (GAUSSIAN ABCD MATRIX)..... 142
3.2.4 طريقة انتشار شعاع الليزر (BPM)..... 145
5. منظومة ضخ الليزر الشمسي بعدستي فرينل..... 146
1.5 منظومة التركيز الاولية باستخدام عدستي فرينل..... 146
2.5 رأس الليزر..... 147
1.2.5 المركز الثاني..... 147
2.2.5 المركز الثالث..... 147
3.2.5 غطاء من السيليكا..... 148
4.2.5 التجويف البصري..... 148
5.2.5 وسط الليزر..... 148

6.2.5 منظومة التبريد..... 148
3.5 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي..... 149
1.3.5 نتائج المحاكاة ببرنامج ZEMAX©..... 149
2.3.5 قياس استطاعة الضخ..... 150
3.3.5 قياس استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال وتوزيع طاقة الضخ:..... 151
4.5 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD©..... 152
6. منظومة ضخ الليزر الشمسي بمرآتين مكافئتين خارج المحور (off-axis parabolic mirror)..... 153
1.6 منظومة التركيز الابتدائية باستخدام مرآتين مكافئتين خارج المحور..... 153
2.6 رأس الليزر..... 154
1.2.6 منظومة التركيز الثانية 3D-CPC..... 154
2.2.6 منظومة التركيز الثالثة..... 154
3.2.6 غطاء من السيليكا..... 155
4.2.6 التجويف البصري..... 155
5.2.6 وسط الليزر..... 155
6.2.6 منظومة التبريد..... 156
3.6 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي الثانية..... 156
1.3.6 نتائج المحاكاة ببرنامج ZEMAX©..... 156
2.3.6 قياس استطاعة الضخ..... 157
3.3.6 قياس استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال وتوزيع طاقة الضخ..... 158
4.6 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD©..... 159
7. مناقشة نتائج محاكاة المنظومتين و مقارنتها..... 160
8.خلاصة..... 165
خاتمة عامة و نظرة مستقبلية..... 167
المراجع..... 170

قائمة الجداول

الجدول. 1.1 - اهم الخطوط الطيفية..... 09
الجدول. 2.1 - الخصائص الحرارية للـ Nd :YAG..... 48
الجدول. 3.1 - الخصائص البصرية و الفيزيائية لـ Nd :YAG..... 49
الجدول. 1.2 - ملخص تطبيقات انواع مختلفة من المركزات..... 84
الجدول. 2.2 - معدل التركيز C و النسبة بين مساحة سطح المرآة على مساحة الفتح A_m/A_{ap}، كدالة لزاوية الحافة ϕ و نصف زاوية القبول θa لمركز القطع المكافئ..... 88
الجدول 1.3 - مقارنة بين انواع الليزرات..... 108
الجدول 2.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة للمعان بالضخ الجانبي..... 130
الجدول 3.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة كفاءة التجميع بالضخ الجانبي... 130
الجدول 4.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة كفاءة التجميع بالضخ الطرفي.. 130
الجدول 5.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة للمعان بالضخ الطرفي..... 131
الجدول 6.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى طاقة ليزر..... 132
الجدول 1.4 - مقارنة بين المنظومتين المقترحتين و منظومات الليزر الشمسي التي اعطت قيم قياسية. 164

قائمة الصور

الصورة. 1.1 - الانبعاث الإشعاعي الطيفي لأجسام سوداء لها درجات حرارة مختلفة..... 09
الصورة. 2.1 - مستوى الطاقة للديود الباعث للضوء..... 11
الصورة. 3.1 - مخطط بسيط نموذجي لليزر..... 13
الصورة. 4.1 - الاسكان النسبي لمستويين من الطاقة المعطى بعلاقة بولتزمان..... 15
الصورة. 5.1 - مخطط توضيحي لعمليات تفاعل المادة مع الاشعاع (أ) عملية الامتصاص – (ب) عملية الاصدار المستحث(القسري) – (جـ) عملية الاصدار التلقائي..... 17
الصورة: 6.1. مبدأ الليزر..... 21
الصورة. 7.1. - حزمة ضوئية بتدفق F تعبر شريحة سمكها dl..... 22
الصورة. 8.1. - مخطط توضيحي لمبدأ عمل الليزر..... 24
الصورة. 9.1. - مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية (أ) مادة ذات ثلاثة مستويات (ب) مادة ذات اربع مستويات..... 26
الصورة. 10.1 - مخطط ليزر ثلاثة مستويات..... 28
الصورة. 11.1 - مخطط ليزر الاربع مستويات..... 29
الصورة. 12.1 - تراكم الذرات في المستوى العلوي عند انسداد التجويف البصري..... 31
الصورة. 13.1 - حدوث مفعول الليزر بمجرد فتح التجويف البصري فجأة..... 32
الصورة. 14.1 - نضوب التجويف البصري بمجرد عودة جميع الذرات إلى الحالة الأرضية..... 32
الصورة. 15.1 - نبضة تنتشر في التجويف البصري لليزر مثبت النمط..... 33
الصورة 16.1. متغيرات النمط المهمة مرنانة بها مرايا ذات انحناء غير متساوٍ..... 35
الصورة. 17.1 - انواع الرنانات الشائعة (نمط الشعاع داخل التجويف مظلل)..... 36
الصورة 18.1. مرنانة Fabry-Perot..... 39
الصورة 19.1. التذبذب في عدة أنماط طيفية..... 40
الصورة. 20.1 - (أ) الأنماط العرضية في تجويف متحد البؤر، (ب) بعض الأنماط العرضي بالليزر.... 42
الصورة. 21.1 - مخطط الحزمة الغاوسية..... 43
الصورة. 22.1 - (أ) سطح السطوع في النقطة O من اجل منبع عام لأمواج كهرومغناطيسية (ب)

سطوع الحزمة الليزرية ذات القطر D و زاوية تفرق θ..... 46
الصورة. 23.1 - مستويات الطاقة للياقوت..... 47
الصورة. 24.1 - مستويات الطاقة بصورة مبسطة لـ Nd:YAG..... 49
الصورة. 1.2 - نموذج بسيط للشمس..... 55
الصورة. 2.2 - الثابت الشمسي S، و متوسط المسافة بين الارض و الشمس الثابت الفلكي $A_{\odot}$..... 57
الصورة. 3.2 - نموذج الطيف المنبعث من الشمس..... 58
الصورة. 4.2 - مفهوم الطول الموجي (البعد بين قمتين متتاليتين لأمواج منتظمة)..... 59
الصورة. 5.2 - الطيف الكهرومغناطيسي و جزء الطيف المرئي..... 60
الصورة. 6.2 - طيف الاشعاع الشمسي لكتلة الهواء 0 و لكتلة الهواء 1.5..... 62
الصورة. 7.2 - مدار الأرض موضح فيه الاختلاف المركزي..... 64
الصورة. 8.2 - زوايا الارض – الشمس الرئيسية..... 65
الصورة. 9.2 - زاويتا ارتفاع الشمس و السمت للنقطة P على الارض..... 66
الصورة. 10.2 - تفاعل ضوء الشمس و الغلاف الجوي..... 71
الصورة. 11.2 - جهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي المباشر..... 73
الصورة. 12.2 - جهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي المنتشر..... 74
الصورة. 13.2 - التصاميم الممكنة للمركزات: (أ) ممتصات أنبوبية ذات عاكس خلفي مشتت، (ب) ممتصات أنبوبية ذات عواكس طرفية مرآوية، (جـ) مستقبل مستوي مع عاكسات مستوية، (د) مكثف مكافئ، (هـ) عاكس فرينل، (و) مجموعة من منظومات تتبع الشمسية مع جهاز استقبال مركزي 75
الصورة. 14.2 - انواع المركزات الضوئية (أ) مركز مسطح مع عاكسات مسطحة من جانب واحد (ب) مركز مكافئ مركب (جـ) المركز الأسطواني المكافئ (د) المركزات الثابتة الموضوعة بشكل دائري مع جهاز استقبال متنقل (هـ) عدسة فرينل (و) مركز مكافئ دوراني..... 78
الصورة. 15.2 - البعد البؤري (OB) و نصف زاوية القبول θ_c لمركز القطع المكافئ..... 81
الصورة. 16.2 - رسم تخطيطي للشمس عند T_s على مسافة R من مكثف بفتحة A_a ومنطقة استقبال A_r..... 82
الصورة. 17.2 - مثال على توزيع التدفق في المستوى البؤري لمركز تصوير خطي. يمتد جهاز الاستقبال من A إلى B..... 85
الصورة. 18.2 - عدسات فرينل المستعمل في المنارات و مبدأ عملها..... 89
الصورة. 19.2 - يتم تحويل العدسة الكروية المقربة العادية إلى عدسة فرينل مكافئة عن طريق ازالة سطحها المستمر. من اجل تقليل كمية المواد المستخدمة في العدسة التقليدية..... 90

الصورة. 20.2 - رسم تخطيطي يبين مبدأ صناعة و عمل مرآة فرينل..... 90
الصورة. 21.2 - عدسة بوافون السطحية المتدرجة لعام 1748 (أ) ، وعدسة فرينل لعام 1822 (ب). الأجزاء المظلمة مادية..... 91
الصورة. 22.2 - القرص الدوار فرينل لمنارة. منظر جانبية وأعلى، مع مجموعتي العدسات التي تشكل مثمنين. تسمى الأشعة المكونة من العدسات الأكبر R ، بينما تسمى الأشعة التي تكونت بواسطة العدسات الأصغر (مع المرايا M) بـ r. الرسم الأصلي لعام 1822 92
الصورة. 23.2 - المركز المخروطي..... 94
الصورة. 24.2 - رسم تخطيطي يوضح هندسة CPC..... 95
الصورة. 25.2 - CPC تم اقتطاع بحيث تكون نسبة ارتفاعها حوالي نصف الارتفاع الكامل..... 97
الصورة. 26.2 - (أ) CPC لجهاز استقبال اسطواني. (ب) عاكس منحني لاستخدامه مع جهاز استقبال اسطواني..... 97
الصورة. 27.2 - اسقاط زاوية القبول لـ CPC على المستوي شمال-جنوب و منحدر لـ (CPC) على محور شرق-غرب..... 99
الصورة. 1.3 رسم تخطيطي لمرنانة الليزر..... 107
الصورة. 2.3 رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطرفي لليزر الشمسي..... 109
الصورة. 3.3 رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزر الشمسي..... 109
الصورة. 4.3 صورة للتركيب التجريبي تظهر السائل النيون في وعاء ديور و مرآة كروية 14 بوصة.. 110
الصورة. 5.3 (أ) رسم تخطيطي لتصميم الضخ الطرفي (ب) صورة فوتوغرافية لمتتبع شمسي وضعت عليه مرأة كروية بقطر 61cm..... 111
الصورة. 6.3 (أ) رأس الليزر موضوع في بؤرة مرآة مكافئة (ب) مخطط لرأس الليزر..... 111
الصورة. 7.3 مخطط الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية عبر تجويف الجسم الأسود..... 112
الصورة. 8.3 تمثيل تخطيطي للتركيب التجريبي. توفر محاكيان للطاقة الشمسية على شكل قوس زينون مدخلات بصرية في تجويف الصندوق الليزري الذي يحتوي على غاز الليزر..... 112
الصورة. 9.3 (أ) ثلاثة مقاطع عرضية لرأس الليزر والمرنانة (ب) مخطط الفرن الشمسي لـ WIS..... 113
الصورة. 10.3 (أ) رسم توضيحي تخطيطي لنظام التركيز الشمسي مع 12 عمودًا متتبع شمسي موجهًا إلى الطابق الثاني عشر من البرج الشمسي كمركز اولي (ب) رسم تخطيطي لرأس الليزر و مرنانة ليزر ألكسندريت..... 113
الصورة. 11.3 (أ) رسم توضيحي تخطيطي لنظام التركيز الشمسي (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 114

الصورة. 12.3 رسم تخطيطي لمرنانة بعاكس حلقي مخروطي وقرص رفيع..... 114
الصورة. 13.3 نظام اختبار لليزر من ضوء الشمس الطبيعي. مكون من عدستي فرينل..... 115
الصورة. 14.3 (أ) رسم تخطيطي لمنظومة الليزر الشمسي، (ب) صورة لمنظومة الليزر الشمسي..... 115
الصورة. 15.3 (أ) نظام الليزر الشمسي مع عدسة فرينل قطرها 0.9 متر ورأس ليزر موضوع في منطقته البؤرية. (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 116
الصورة. 16.3 رسم تخطيطي لرأس الليزر وعدسة الدليل الضوئي المائية..... 116
الصورة 17.3 (أ) نظام التركيز الاولي لليزر الشمسي بمرآة قطعية مكافئة (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 117
الصورة. 18.3 (أ) مخطط مرايا مستوية متعددة - عدسة فرينل لليزر القرص الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 117
الصورة. 19.3 التركيب التخطيطي لتجربة ليزر الألياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية..... 118
الصورة. 20.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بمرآة مكافئة لمركز MSSF (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 118
الصورة. 21.3 صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر موضوعة في بؤرة مرآة قطعية مكافئة. 119
الصورة. 22.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بعدسة فرينل (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر..... 119
الصورة. 23.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بعدسة فرينل (ب) مخطط لمنظومة التركيز الاولية والثانية و مرنانة الليزر..... 120
الصورة. 24.3 (أ) صورة لرأس ليزر Nd: YAG موضوع في بؤرة مرآة قطعية مكافئة. (ب) صورة التصميم الميكانيكي لرأس الليزر Nd: YAG ، المكون من عدسة مخروطية من السيليكا وتجويف الضخ المخروطي (ج) مخطط التصميم الميكانيكي لرأس الليزر..... 120
الصورة. 25.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بمرآة مكافئة لمركز MSSF (ب) صورة لرأس الليزر موضوع في بؤرة المرآة..... 121
الصورة. 26.3 (أ) مخطط نظام التتبع ذو مرآة قطعية مكافئة لمركز PROMES-CNRS. (ب) صورة نظام ليزر Nd: YAG الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (ج) صورة للمنظر الأمامي لتجويف الرنان لليزر غير المتماثل لاستخراج وضع TEM00..... 121
الصورة. 27.3 رسم توضيحي لعناصر نقل الطاقة المتسلسلة لجهاز الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية..... 122
الصورة. 28.3 (أ) المنظر الأمامي و(ب) المنظر الجانبي، لتصميم ضخ الليزر الشمسي البسيط 122

بواسطة نماذج ZEMAX© المظللة.....
الصورة. 29.3 تصميم رأس الليزر Nd: YAG، المكون من عدسة شبه كروية من السيليكا، وتجويف الضخ المخروطي و مرنانة الليزر..... 123
الصورة. 30.3 تصميم رأس الليزر Nd: YAG، المكون من عدسة شبه كروية من السيليكا، وتجويف الضخ المخروطي و مرنانة الليزر..... 123
الصورة. 31.3 نظام الليزر الشمسي مع دليل ضوئي ملتوي من السيليكا لاستخراج طاقة الليزر المستقرة TEM_{00}..... 124
الصورة. 32.3 (أ) رسم تخطيطي مقطعي لليزر الالياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية مع هندسة الإثارة المستعرضة التي تم تطويرها (ب) صورة ليزر الألياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية..... 124
الصورة. 33.3 التركيب التجريبي (أ) نظام القياس. (ب) بنية المرآة النشطة مضخمة لضوء. (ج) نظام مضخم للضوء بمرآة نشطة بمرحلتين. (د) نظام مضخم للضوء بمرآة نشطة رباعي المراحل..... 125
الصورة. 34.3 (أ) صورة فوتوغرافية، لعدسة فرينل ، و رأس الليزر ونظام تتبع الشمس لمعهد بكين للتكنولوجيا. (ب) رسم تخطيطي لرأس الليزر يتكون من أنبوب كوارتز وتجويف الضخ المخروطي..... 125
الصورة. 35.3 (أ) مخططات نظام المرآة المكافئة لجامعة لشبونة الجديدة. (ب) بصورة فوتوغرافية لرأس الليزر الشمسي Nd: YAG ، (جـ) مخطط لمنظر أمامي لتصميم رأس الليزر..... 126
الصورة. 36.3 (أ) منظر أمامي لرأس الليزر الشمسي مع مرآة حماية لتجنب المحاذاة العرضية للنقطة البؤرية. (ب) منظر جانبي لرأس الليزر الشمسي. مع منظومة تبريد فريدة لقضيب الليزر و دليل ضوئي عبارة عن عدسة من السيليكا وتجويف الضخ المخروطي..... 126
الصورة. 37.3 (أ) رسم تخطيطي لتجويف الليزر، قضيب Nd: YAG، وغرفة سائل التبريد المتشتت. (ب) صورة فوتوغرافية لليزر الشمسي التجريبي قيد التشغيل. يتوافق المربع الداخلي الأحمر مع أجزاء الليزر الموضحة في الجزء (أ)..... 127
الصورة. 38.3 (أ) مخطط رأس الليزر الشمسي 1064nm الذي يتم ضخه من الطرف و الجانب وجهاز مرنان الليزر. (ب) مخطط مجانس، شعاع ضوء الشمسي المركز..... 127
الصورة. 1.4 وسط الليزر مكون من YAG / Nd :YAG / YAG..... 136
الصورة. 2.4 واجهة برنامج ZEMAX© 137
الصورة. 3.4 كائنات من الوضع غير التسلسلي لـ ZEMAX© لنمذجة عدسة فرينل..... 137
الصورة. 4.4 (أ) تصميم الوسيط الفعال و الكاشف الحجمي في برنامج ZEMAX©. (ب) توزيعات تدفق طاقة الضخ الممتصة على طول خمسة مقاطع عرضية ومقطع طولي مركزي لقضيب Nd: YAG (34) الذي يتم ضخه في النهاية ، والذي تم الحصول عليه بواسطة المحاكاة العددية

ZEMAX© من خلال كاشف حجمي..... 138
الصورة. 5.4 (أ) نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامج LASCAD© (ب) متغيرات ضخ الليزر التي تم الحصول عليها من خلال ملف بيانات ZEMAX©..... 140
الصورة. 6.4 (أ) متغيرات التبريد لنظام الليزر ذو الضخ الطرفي (ب) متغيرات مادة الليزر :Nd YAG..... 140
الصورة. 7.4 شبكة غير منظمة في حالة وجود الوسط ليزري..... 142
الصورة. 8.4 توزيعات الحمل الحراري ودرجة الحرارة وشدة الإجهاد، تمت محاكاتها عدديًا في LASCAD© لوسط فعال قطره 5mm وطوله 25mm منNd: YAG..... 142
الصورة. 9.4 طريقة القطع المكافئ لتحديد العنصر التمثيلي للوسط النشط داخل تجويف الرنان..... 143
الصورة. 10.4 تمثيل تجويف الرنين وشعاع الليزر المنتشر في المستويات X-Z و Y-Z من أجل الإنتاج الفعال لطاقة الليزر الشمسية ذات النمط الأساسي..... 143
الصورة. 11.4 طاقة خرج الليزر المحسوبة عدديًا كدالة لـ (أ) طاقة الضخ الممتصة و (ب) انعكاسية مقرنة الخرج ، للمرجع..... 144
الصورة. 12.4 (أ) نصف قطر شعاع الليزر BPM على تكرار التجويف و (ب) ملف شعاع المرآة الناتج ، للمرجع..... 145
الصورة. 13.4 منظومة التركيز الابتدائية المتناظرة المكونة من عدستي فرينل F_1 و F_2 ، و مرآتين مستويتين M_1 و M_2..... 146
الصورة. 14.4 منظومة التركيز الثانية المتناظرة و المكونة من مركزين من نوع 3D-CPC، و عدستين رقيقتين مثقوبتين من السيليكا، و تجويف بصري عبارة عن مرآتين مخروطيتين..... 147
الصورة. 15.4 (أ) عدسة محدبة من السيليكا مثقوبة، (ب) غطاء من السيليكا مثقوب، (جـ) مرأة مخروطية..... 148
الصورة. 16.4 وسط الليزر مكون من YAG / Nd :YAG / YAG..... 148
الصورة. 17.4 منظومة التبريد..... 149
الصورة. 18.4 مقطع عرض لتوزيع الاشعاع عند بؤرة عدسة فرينل 150
الصورة. 19.4 مقطع طولي لتوزيع الاشعاع عند بؤرة عدسة فرينل 151
الصورة. 20.4 توزيع طاقة الضخ الممتصة في الوسط الفعال بمقطع طولي واحد و تسعة مقاطع عرضية متناظرة..... 152
الصورة. 21.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير انعكاسية مرآة الاخراج..... 152
الصورة. 22.4 منظومة التركيز الابتدائية مكونة من مرآتين مكافئتين خارج المحورP1 و P2..... 153

الصورة. 23.4 رأس الليزر مكون من مرآتين من نوع 3D-CPC و عدسة من السيليكا و تجويف ضخ عبارة عن مرآتين مخروطيتين..... 154
الصورة. 24.4 منظومة التركيز الثالثة و التجويف البصري و منظومة التبريد..... 155
الصورة. 25.4 وسط الليزر مكون من YAG / Nd :YAG / YAG..... 156
الصورة. 26.4 مقطع عرض لتوزيع الاشعاع عند بؤرة المرآة القطعية المكافئة..... 157
الصورة. 27.4 مقطع طولي لتوزيع الاشعاع عند بؤرة المرآة القطعية المكافئة..... 158
الصورة. 28.4 توزيع طاقة الضخ الممتصة في الوسط الفعال بمقطع طولي واحد و تسعة مقاطع عرضية متناظرة..... 159
الصورة. 29.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير انعكاسية مرآة الاخراج..... 159
الصورة. 30.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير طول قضيب الليزر الاجمالي لمنظومة عدسة فرينل... 163
الصورة. 31.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير قطر قضيب الليزر لمنظومة المرآة المكافئة..... 163

قائمة الرموز

الرمز	الاسم
$\rho(v)$	كثافة الطاقة الاشعاعية
h	ثابت بلانك
K	ثابت بولتزمان
C	سرعة الضوء في الخلاء
v	تردد الاشعاع
M	التدفق الاشعاعي الكلي
σ	ثابت بولتزمان
$\mathcal{E}$	انبعاثيه سطح المادة
$M_\lambda(T)$	التدفق الاشعاعي الكلي لكل وحدة طول موجي
T	درجة الحرارة
λ	الطول الموجي
ΔE	فرق الطاقة
E_g	الفجوة الممنوعة
E_f	مستوى فرمي
N	عدد الذرات في مستوى
g_i	درجة توالد المستوى
W_{12}	معدل الامتصاص
σ_{12}	المقطع العرضي للامتصاص
F	تدفق الفوتونات
A	معامل الاصدار التلقائي
τ_{sp}	مدة حياة الانحلال الاشعاع
τ_{nr}	مدة حياة الانحلال اللإشعاعي
W_{21}	معدل الإصدار المحث
σ_{21}	المقطع العرضي للإصدار المحث
B	معامل اينشتاين
G	كسب القضيب
R	انعكاسية المرآة
A	معامل الامتصاص
N_c	الانقلاب الحرج
N_t	الكثافة الكلية للذرات في المادة
W_p	معامل الضخ
w_0	قطر خصر الحزمة
L	طول الرنانة
A_0	سعة الموجة المستوية
R	السعة المنعكسة للموجة المستوية
R(z)	نصف قطر انحناء جبهة الموجة
S	الثابت الشمسي
$L_\odot$	إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي

$A_{\odot}$	متوسط المسافة بين الشمس والأرض
$\tau_{\odot}$	الزمن الضوئي للوحدة الفلكية للمسافة
$m_{\odot}$	كتلة الشمس
$r_{\odot}$	نصف قطر الشمس
$U_{\odot}$	قدرة انبعاث سطح الشمس
$T_{\odot}$	درجة حرارة سطح الشمس
I_{sc}	شدة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي
h	زاوية الوقت الشمسي
d	زاوية ميل الشمس
$\boldsymbol{\alpha}$	زاوية خط العرض
β	زاوية ارتفاع الشمس
γ	زاوية السمت
$\boldsymbol{C_{area}}$	معدل تركيز السطح
$\boldsymbol{C_{flux}}$	معدل تركيز التدفق الضوئي
$\boldsymbol{\theta_a}$	زاوية القبول
H	الكفاءة البصرية
M^2	معامل جودة الشعاع
Q(x, y, z)	توزيع الحمل الحراري في الوسط الفعال
ε_{ij}	موتر الاجهاد
η_p	كفاءة الضخ

قائمة المصطلحات

الانجليزية	العربية
Absorption	امتصاص
Acceptance angle	زاوية القبول
Active laser medium	الوسط الليزري الفعال
Air mass	كتلة الهواء
Altitude angle	زاوية الارتفاع
Aphelion	الاوج الشمسي
Aspherical	شبه كروي
Axial Modes	انماط محورية
Azimuth angle	زاوية السمت
Beam	شعاع
Blackbody	جسم اسود
Brightness	السطوع (اللمعان)
Broad-band	عريض النطاق
Cavity	تجويف
Chromosphere	طبقة الكروموسفير
Coherence	ترابط
Collector	مجمع
Collimation	توازي الحزم الضوئية
Concentrator	مركز
Continuous wave	الحزمة الضوئية مستمرة التدفق
Cooling system	منظومة التبريد
Corona	طبقة الاكليل
Decay	اضمحلال
Density	كثافة
Detectors	كاشف
Directionality	الاتجاهية
Earth’s atmosphere	الغلاف الجوي الارضي
Efficiency	كفاءة
Electromagnetic	كهرطيسي
Emission	اصدار
Emittance	الانبعاث
End-pumping	ضخ من النهاية (طرفي)
Equator	خط الاستواء
Excited level	مستوى اثارة (تهيج)
Feedback	تغذية راجعة

Fiber	الألياف
Figure of merit	رقم الجدارة (الاستحقاق)
First-stage	المرحلة الأولى
Flash lamp	مصباح ومضي
Fluorescent	تفلور، فلورة
Fossil fuels	الوقود الاحفوري
Four level laser	ليزر الاربع مستويات
Fresnel	فرينل
Fused silica	السيليكا المنصهرة
Gain	كسب (ربح)
Gaussian	غاوسي
Greenwich line	خط غرينيتش
Grooved	مخدد (محزز)
Ground state	المستوى الارضي (الحالة الدنيا)
Half width	الاتساع النصفي
Heliostat	متتبع الشمس
Infrared	تحت الحمراء
Intensity	الشدة
Invisible radiation	إشعاع لا مرئي
Laser	ليزر
laser amplifier	مضخم ليزري
laser diode	ديود ليزري
Laser head	رأس الليزر
laser medium	وسط ليزري
laser threshold	عتبة الليزر
Latitude	خط العرض
Lifetime	العمر الزمني
Longitude	خط الطول
Longitudinal	طولي
Maser	ميزر
Microwave	موجات مكروية
Mode	نمط
Mode locking	تثبيت النمط
Modeling	نمذجة
Monochromatic	أحادي اللون
Mono-Mode	احادي النمط
Multimode	متعدد الانماط
Narrow-band	ضيق النطاق
Nd :YAG laser	ليزر نيوديميوم ياغ

Nonimaging	غير التصويري
Non-sequential	غير متسلسل
Off-axis	خارج المحور
Output coupler (output mirror)	قارنة التوصيل الخارجة
Parabolic	مكافئ
Parameters	معلمات
Perihelion	الحضيض الشمسي
Phase	الطور
Photoelectric	كهروضوئية
Photosphere	طبقة الفوتوسفير
Pixel	بيكسل (عنصر صورة)
Population Inversion	انعكاس إسكاني (شعبية معكوسة)
Primary concentrator	مركز اولي
Pulse	نبضة
Pumped	مضخوخ
Pyranometer	مقياس الإشعاع السماوي
Q-switched	عامل تبديل الجودة
Rare-earth	الاتربة النادرة
Rate Equations	معادلات المعدلات الزمنية
Reference	مرجعي
Resonator	مجاوبة (مرنانة)
Ring-array	صفيف حلقات
Rod	قضيب
Ruby	الياقوت
Secondary concentrator	مركز ثانوي
Second-stage	المرحلة الثانية
Semi - conductors	أنصاف النواقل
Side-pumping	ضخ جانبي
Simulation	محاكاة
Single crystal	بلورة أحادية
Slope	ميل (انحدار)
Solar constant	الثابت الشمسي
Solar furnace	فرن شمسي
Solar laser	الليزر الشمسي
Source	مصدر (منبع)
Spectrum	طيف
Spontaneous	تلقائي
Stimulation	الحث
Thermal convection	حمل حراري

Three level laser	ليزر الثلاث مستويات
Tracking system	منظومة التتبع
Transversal	مستعرض
Transverse Modes	الأنماط العرضية
Ultraviolet rays	الأشعة فوق البنفسجية
Visible light	ضوء مرئي
Voxel	فوكسل (عنصر حجم)
Xenon	الزنون
Yttrium-Aluminum-Garne (YAG)	عقيق الالمنيوم يتريوم

الملخص:

نقترح في هذا العمل نهج إضافي لأنظمة ضخ الليزر الشمسي، بطريقة الضخ من كلا الطرفين، لتحسين طاقة الليزر الشمسي متعدد الأوضاع بشكل كبير. في هذا السياق تم اقتراح مخططين لنظام ضخ ليزر شمسي متناظر مع نفس منطقة التجميع الفعالة، من أجل الوصول إلى استخراج فعال لطاقة الليزر الشمسي متعدد الأوضاع وبالتالي مقارنة كفاءتها. يتكون الأول من زوجين من عدسات فرينل - مرآة مسطحة قابلة للطي، والثاني بواسطة مرايا مكافئة خارج المحور، لتجميع وإعادة توجيه وتركيز الإشعاع الشمسي الوارد نحو رأس الليزر. لكلا النموذجين، يتم استخدام مركزين مكافئين مركبين مجوفين ثلاثي الأبعاد (3D-CPC) لزيادة ضغط الإشعاع الشمسي المركز إلى قضيب ليزر من YAG / 1.0% Nd: YAG / YAG بقطر 9.5mm و طول اجمالي 42mm و 46mm للمنظومة الاولى و الثانية على الترتيب. داخل اثنين من تجاويف ضخ مخروطية مجوفة. من خلال التحليل العددي لبرنامجي ZEMAX© وLASCAD ، تم العثور على كل من ظروف الضخ المثلى ومعايير مرنانة الليزر. علاوة على ذلك، تحسب طاقة الليزر متعدد الأنماط البالغة 242.4 واط و 275.4 واط للنظام باستخدام عدسات فرينل - المرايا القابلة للطي المسطحة والنظام الذي يحتوي على مرايا مكافئة خارج المحور على التوالي. ارتبطت كفاءات التجميع البالغة $30.3W/m^2$ و $34.4W/m^2$ أخيرا بطاقة الليزر الشمسي المذكورة اعلاه.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي، مرآة خارج المحور، عدسة فرينل، ضخ الليزر متعددة الأنماط بالطاقة الشمسية، بلورة YAG / Nd: YAG / YAG، الضخ من كلا الطرفين.

Abstract :

An additional approach to solar-laser pumping systems, the end-side end pumping method, is here proposed to improve substantially multimode solar-laser power. In this context, two schemes of a symmetrical solar-laser pumping system with the same effective collection area are suggested, in order to reach an efficient extraction of multimode solar-laser power and hence compare their efficiencies. The first is composed of two pairs of Fresnel lens - flat folding mirror, the second by off axis parabolic mirrors, for both collecting, redirecting, and concentrating the incoming solar radiation towards a laser head. For both models, two hollow three-dimensional compound parabolic concentrators (3D-CPC) are used to further compress the concentrated solar-radiation into a 9.5 mm diameter, and total length 42 mm and 46 mm for the first and second systems, respectively. 1.0 at% bonding YAG / Nd: YAG / YAG rod within two hollow conical pumping cavities. Through ZEMAX© and LASCAD© numerical analysis, both optimum pumping conditions and laser resonator parameters are found. Furthermore, multimode laser powers of 242.4 W and 275.4 W are calculated for the system using Fresnel lenses - flat folding mirrors and the system with off axis parabolic mirrors, respectively. Collection efficiencies of 30.3 W / m^2 and 34.4 W / m^2 were finally associated with these solar-laser powers.

Keywords: solar radiation, off axis parabolic mirror, Fresnel lens, Solar multi-mode laser pumping, YAG/ Nd: YAG/ YAG, crystal end-side-end pumping method.

المقدمة العامة

مقدمة عامة:

تميز القرن العشرين بطفرة علمية هائلة، كان يعتقد أنها خيالا، ومنها ما تنبأ به العالم ألبرت اينشتاين عام 1917 [1] في تضخيم الإشعاع الضوئي بالانبعاث المحث، في مواد فعالة كهرومغناطيسيا وهذا ما يعرف في ما بعد بأشعة الليزر. لم يكن من الممكن تحقيق هذه الفكرة في ذلك الوقت لاعتبارات متعددة، منها كيفية الحصول على ضوء محث الى غاية الخمسينات من القرن الماضي، حيث استفاد تشارلز تاونز (Charles Townes) لبناء مضخم الميكروويف المشار إليه باسم مازر (maser) من عملية الانبعاث المحث، أنتج هذا الجهاز حزمة متماسكة من الموجات الدقيقة لاستخدامها في الاتصالات. في عام 1958 نشر Townes وSchawlow ورقة بحثية تتعلق بأفكارهم حول توسيع مفهوم maser إلى الترددات الضوئية. لقد طوروا مفهوم مكبر بصري محاط بتجويف رنان عبارة عن مرايا للسماح بنمو الحزمة. في عام 1959 اقترح جوردون جولد (Gordon Gould) أن الانبعاثات المحثة يمكن استخدامها لتضخيم الضوء. وهو يصف مرنان بصري يمكن أن ينتج شعاع ضيق من الضوء المتماسك، وسماه "الليزر"[2]. في عام 1960 أنتج ثيودور ميمان (Theodore Maiman) من مختبرات أبحاث هيوز (Hughes Research Laboratories) أول ليزر باستخدام بلورة الياقوت كمضخم للضوء ومصباح وميضي كمصدر للطاقة[3]. كلمة ليزر (Laser) هي كلمة مركبة من الحروف الاولى للعبارة التالية: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation و تعني تضخيم الضوء بواسطة الانبعاث المحث للإشعاع. كان هذا العمل بمثابة المفتاح للخزانة المليئة بأنواع اخرى من الليزرات التي تنتظر الاكتشاف، ستة سنوات فقط تم تشييد نماذج ليزرية عاملة من الغازات و المواد الصلبة و السائلة و كذلك اشباه الموصلات، التي حفزها انجاز ميمان، وبحلول ذلك العقد تم العثور على مئات المواد القادرة على احداث الفعل الليزري[2، 4].

ظهرت فكرة الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (الليزر الشمسي) بعد فترة قصيرة من اختراع الليزر[5]. تم البرهنة عن امكانية الضخ بالطاقة الشمسية في عام 1963 بواسطة Kiss ومن معه، باستخدام بلورة فلوريد الكالسيوم (CaF_2) مطعم مع الديسبروسيوم ثنائي التكافؤ (Dy^{2+}: CaF_2) عند درجة حرارة نيون سائل (Ne) [6]. بعد ذلك بوقت قصير و بالضبط سنة 1966 ابلغ C.G. Young عن الحصول على 1W ليزر بنظام الموجة المستمرة عن طريق الضخ الطرفي الجانبي لوسط فعال من Nd: YAG [7]. تم النظر في الأنظمة التي تستخدم الشمس لضخ وسائط صلبة [7] سائلة [8] وغازية [9،13]. ومع ذلك فإن ابحاث الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية قد تقاربت بشكل أساسي في أنظمة ذات مواد صلبة تعمل في وضع الموجة المستمرة (cw). من بين العديد من مواد الليزر يبدو أن الليزر الصلب و خاصة Nd: YAG و Cr: Nd: YAG [14-18]، هو الأكثر جاذبية بسبب كثافته العالية للطاقة وانضغاطه، وعتبة الضخ المنخفضة نسبيًا، وإمكانية تحويل الطاقة الشمسية إلى الليزر بكفاءة. استمرت التطورات في المواد البصرية والليزر في تحسين أداء الليزر الشمسي للحالة الصلبة [19] ومع ذلك هناك حاجة لأنظمة تركيز إضافية لتجميع وتركيز الإشعاع الشمسي لأن ضوء الشمس الطبيعي لا يوفر كثافة

طاقة كافية لإنتاج الليزر. تم استكشاف المرايا المكافئة منذ فترة طويلة لتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي الوارد [14،15،20-22]، الا انه حدثت معظم الجهود الهامة من الناحية التكنولوجية منذ سنة 2007، بعد اعتماد عدسات فرينل كمركزات أولية للطاقة الشمسية، مما زاد بشكل كبير من كفاءة الليزر الشمسي [16-18، 23-45] بالمقارنة مع أنظمة المرآة المكافئة، يقلل استخدام عدسات فرينل من تعقيد الليزر الشمسي ووزنه وتكلفته. الا ان للمرايا المكافئة مزايا تم اثباتها من خلال العديد من طرق الضخ التي اعطت قيم قياسية لمختلف متغيرات منظومات الليزر الشمسي [37، 39، 41، 44، 46].

بين عامي 1966 و 1988، كان هناك ميل لزيادة طاقة الليزر [7، 21، 22]، ومع ذلك فإن أهم عامل لتقييم الليزر الشمسي هو كفاءته، والتي لم يتم النظر فيها بجدية حتى عام 1996 من قبل Jenkins ومن معه الذي أبلغ عن زيادة كبيرة في إنتاج الليزر الشمسي لكل وحدة مساحة لمنطقة التجميع، تم تحقيق الرقم القياسي عمليا في كفاءة تجميع الليزر الشمسي و التي قدرت بـ $32.5W/m^2$ بواسطة Dawei Liang و من معه سنة 2018، و ذلك بالضخ الطرفي لوسط ليزر من Cr:Nd:YAG بواسطة مرآة مكافئة. سطوع شعاع الليزر الشمسي هو أيضا معلمة مهمة جدًا، التي تم إهمالها حتى عام 2003 من قبل Lando و من معه الذي حقق 0.032W لمعان. تم تعزيز هذه القيمة من خلال منظومات ضخ عديدة ، بلغ الرقم القياسي لهذه المتغيرة 6.5W سنة 2017 من طرف Dawei Liang و من معه [40]، عن طريق الضخ الطرفي لوسط فعال من Nd :YAG ، بقطر 4mm و بطول 35mm باستخدام مرأة مكافئة بقطر 1.4m. وهي تمثل الرقم القياسي الى يومنا هذا.

اقتصرت منظومات الليزر الشمسي المقترحة منذ البرهنة الاولى عليه على طريقتين لضخ الوسط الفعال، وهما الضخ الطرفي و الضخ الجانبي. تم التقدم في تحقيق كفاءة الليزر الشمسي بواسطة منظومات الضخ الطرفي [16-18، 27، 31، 39، 40، 44، 45، 47]، لأنها يمكن أن تؤدي إلى كفاءات أعلى بكثير مقارنة بتصاميم الضخ الجانبي، ومع ذلك فإن سطوع الليزر الشمسي و ثباته تم تحقيقها في منظومات الضخ الجانبي [14، 15، 21، 23، 26، 28- 30، 32- 34، 37، 38، 41، 48- 51]، وهو عبارة عن تصميم فعال لقياس الطاقة حيث أنه يسمح بالامتصاص الموحد على طول محور وسط الليزر، وبالتالي تحسين الأداء الحراري لأجهزة الليزر الشمسية. إلى جانب ذلك يسمح الوصول الحر إلى كل من نهايات الاوساط الفعالة المضخة من الجانب بتحسين المزيد من متغيرات المرنان الليزري، مما يحسن بشكل كبير جودة حزمة الليزر ويتيح استخلاص الليزر الشمسي بكفاءة في أوضاع دنيا، عند مقارنته مع تصاميم الضخ الطرفي.

تؤثر طريقة توجيه ضوء الضخ نحو الوسط الفعال (ضخ جانبي / ضخ طرفي- جانبي) على خصائص حزمة الليزر الشمسي الناتجة. لذى كان احد اهداف مشروع الدكتوراه هذا هو اقتراح منظومة لضخ الليزر الشمسي تجمع بين ايجابيات طريقتي الضخ و هي الضخ من كلا الطرفين، حيث يحقق الضخ الطرفي منظومة بكفاءة عالية، و الضخ من كلا الطرفين يضمن توزيع جيدا للإشعاع على طول الوسط الفعال مما يقلل من تأثيرات الحمل الحراري

داخل الوسط الفعال و الذي سيحسن من جودة شعاع الليزر. سيتم اختبار طريقة الضخ المقترحة باستخدام مركزين اساسيين هما عدسة فرينل و المرآة المكافئة خارج المحور.

تعتبر أجهزة الليزر التي تعمل بالطاقة الشمسية مرغوبة للغاية في توفير إشعاع ليزر متماسك وفعال من حيث التكلفة بطريقة صديقة للبيئة، خاصة في الأماكن التي تكثر فيها الشمس وتندر فيها مصادر الطاقة الأخرى(الفضاء الخارجي). كان الباحثون متحمسين للغاية لبناء أكثر أنواع الليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية كفاءة لأنها ضرورية لنجاح العديد من التطبيقات، مثل اختزال المغنيسيوم (Mg) من أكسيد المغنيسيوم (MgO). يمكن أن يكون المغنيسيوم بديلاً للوقود الأحفوري. أصبحت الأهمية الاقتصادية لليزر عالي الكفاءة الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية أكثر وضوحًا من أي وقت مضى. تتمتع هذه التكنولوجيا بإمكانيات كبيرة للعديد من التطبيقات الأخرى مثل استشعار الأرض والمحيطات والغلاف الجوي، كشف وإضاءة و تتبع الأهداف الصعبة في الفضاء، اتصالات الفضاء السحيق، اضافة لمختلف التطبيقات الارضية لليزر بشكل عام كالطب و الصناعة ...إلخ.

تم هذا العمل بمخبر استغلال وتثمين المصادر الطاقوية الصحراوية بجامعة الوادي في اطار محور عمله في ميدان الليزر الشمسي من اجل تطوير هذا النوع من الليزرات. و بمساهمة مخبر الليزر الشمسي بجامعة لشبونة الجديدة - البرتغال. هذه الدراسة تعني التضخيم من الطرفين بغية الحصول على أعلى مردودية. ولإنجاز هذا العمل، اتبعت الخطوات التالية:

تم التطرق في الفصل الاول الى مبادئ الليزر، يهدف هذا الفصل إلى تقديم المصطلحات والمفاهيم المتعلقة بالليزرات. يبدأ بمناقشة الضوء و مصادره التقليدية، ثم التطرق الى مبدأ انتاج ضوء الليزر باعتباره نوع خاص من الضوء، ثم ديناميكيات إثارة مادة الليزر، يمضي هذا الفصل في وصف الرنانات الضوئية، أنماط الليزر، أو أنماط الإشعاع المسموح بها، وانتشار الحزم الغاوسية، ويختتم الفصل بمناقشة لأهم أنواع الليزر الصلبة ثم اهم تطبيقات الليزر.

أما الفصل الثاني فموضوعه، الشمس مصدر الضوء حيث تم عرض اساسيات حول الشمس: بنية الشمس و طبيعة الاشعاع الشمسي و قيمة الاشعاع الشمسي خارج الغلاف الغازي و المعاملات الاساسية للشمس، يتضمن هذا الفصل تعريفات و معادلات حساب الزوايا الشمسية الناتجة عن حركة الارض حول الشمس، و كيفية حساب الاشعاع الشمسي الساقط و طرق قياس الاشعاع الشمسي المعتمدة، و يختم هذا الفصل بدراسة نظرية تصف بمزيد من التفصيل أنظمة تجميع وتركيز الطاقة الشمسية المستخدمة في مختلف تطبيقات الطاقة الشمسية على غرار الليزر الشمسي ثم تعريف بأهم المركزات الشمسية المستخدمة لتركيز الإشعاع الشمسي.

الليزر الشمسي دراسة نظرية وتاريخية هو موضوع البحث، يقدم هذا الفصل تعريف بتكنولوجيا الليزر الشمسي و اهم تطبيقاته. تم عرض ايضا اسس تقنية الليزر الشمسي تم فيه توضيح اهم المكونات الاساسية

لمنظومات الليزر الشمسي و كذلك طرق ضخ الوسط الفعال بالضوء. ثم عرض نبذة تاريخية تم سرد فيه اهم محطات تطور الليزر الشمسي من سنة 1963 الى غاية 2021. ختم الفصل بأهم الارقام القياسية المحققة الى يومنا هذا.

اما الفصل الرابع فهو يمثل زبدة هذا العمل و الذي استهل بأهداف المشروع و اهميته كما تضمن الخيارات المتاحة لمكونات منظومتي الليزر المقترحتين في هذا المشروع. كما تم التطرق لأدوات النمذجة العددية و المحاكاة المستخدمة لتحقيق منظومتي الليزر الشمسي تم شرح دور برنامجي ZEMAX© و LASCAD© في تقنية الليزر الشمسي. ختمت الدراسة بعرض نتائج المحاكاة و مناقشتها و مقارنتها.

الفصل الاول

مبادئ الليزر

1. مبادئ الليزر

1. مقدمة:

نعلم جميعا أن الضوء هو عبارة عن أمواج كهرطيسية مبعثرة مختلفة في التردد ما يجعلها ذات ألوان مختلفة تحمل طاقة ضعيفة، تستخدم في العديد من المجالات الحياتية اليومية كإضاءة المنازل و الشوارع. الليزر هو نوع من أنواع هذا الضوء لكنه يختلف عنه بالعديد من الصفات التي جعلته يتمتع بالعديد من المقدرات التي حولته إلى شعاع قوي يحمل طاقة هائلة مقارنة بالطاقة الضوئية العادية، لذلك استخدم الإنسان هذا الشعاع في العديد من المجالات الحياتية حيث سمح له بتبسيط و تسهيل العديد من الأعمال المعقدة مما يجعله يحقق ثورة في جميع العلوم والتطبيقات المختلفة.

2. طبيعة الضوء:

أثبتت أحدث نظريات تشكل الكون أن الكون تشكل نتيجةً لانفجار عظيم للضوء، فالضوء بدأ مع بداية الكون، يحمل جميع أسراره، يجوب أرجاءه بسرعة فائقة هي أعلى سرعة عرفتها الطبيعة إلى الآن، بحركة لا تعرف السكون .أثار فضول الفلاسفة والعلماء منذ أقدم العصور. فمنذ أن وجد الإنسان على الأرض جذب الضوء اهتمامه فهو يلاحظ الضوء في كل مكان، وهذا ما دفع العلماء إلى وضع الكثير من الفرضيات والنظريات التي تحاول كشف ماهية الضوء وكنهه. بدأت المحاولات العلمية والعملية الهادفة إلى دراسة سلوك الضوء ومعرفة القوانين التي تحكمه وتفسير ماهيته منذ ما يزيد عن الألف عام، حيث كانت الريادة العلمية للعلماء المسلمين الذين أبدعوا في شتى المجالات والتي كان الضوء واحداً من أهمها .كان من أبرز رواد هذا المجال ابن الهيثم وجابر بن حيان، وبعد ذلك عقبهم العديد من العلماء الأوروبيين أمثال وهرتز (Hertz) و مكسويل (Maxwell) و هويغنز (Huygens) و نيوتن (Newton) و أينشتاين (Einstein) وبلانك (Planck) سنعرض فيما يلي أهم النظريات التي حاولت شرح طبيعة الضوء وتفسير سلوكه حسب ترتيبها الزمني:

2.2 النظرية الجسيمية (Particle Theory) :

العالم إسحاق نيوتن (Isaac Newton) هو صاحب هذه النظرية قال فيها إن الضوء يتكون من سيل من الجسيمات تصدر من المنابع المضيئة وتنتشر في الفضاء وفق خطوط مستقيمة وأن هذه الجسيمات تحرض حاسة الرؤية عند دخولها العين .تمكن نيوتن باستخدام هذه النظرية من تفسير انعكاس وانكسار الضوء. قبل معظم العلماء بنظرية نيوتن الجسيمية على الرغم أن نظرية أخرى طُرحت خلال فترة حياة نيوتن افترضت أن الضوء ربما يكون، شكلاً من أشكال الحركة الموجية [2،53].

3.2 النظرية الموجية (Wave Theory):

في عام 1678 اقترح الفيزيائي الهولندي كريستيان هويغنز(Christian Huygens) أن للضوء طبيعة موجيـــة

تشبه الأمواج المنتشرة على سطح الماء مستنداً في ذلك إلى ظاهرة انعراج الضوء عند الحواف أو عند اجتيازه ثقباً أو شقاً ضيقاً وهي ظاهرة موجية صرفة، وبين هويغنز أنه يمكن تفسير انعكاس الضوء وانكساره بناء على النظرية الموجية للضوء .لم تلق النظرية الموجية قبولاً لدى العلماء في ذلك الحين كون الأمواج المعروفة في تلك الفترة هي أمواج ميكانيكية لا يمكنها الانتشار في الخلاء لأنها تحتاج إلى وسط تنتشر ضمنه والذي يدعى وسط الانتشار ويعتبر وجوده شرطاً لوجود مثل هذه الأمواج وانتشارها، بينما يقطع الضوء ملايين الكيلومترات في الخلاء قادماً من الشمس والنجوم الأكثر بعداً . وهذا ما حذي بالعلماء فيما بعد بفرض وجود وسط يملأ الفضاء أسموه الأثير. قدم توماس يونغ(Young Thomas) في عام 1801 أول دليل واضح على الطبيعة الموجية للضوء من خلال تجربته المشهورة ـ شقي يونغ ـ التي بين فيها أن أشعة الضوء تتداخل مع بعضاها البعض لتشكل مناطق ذات شدة إضاءة عظمى ومناطق مظلمة ضمن شروط ملائمة .لا يمكن تفسير مثل هذا السلوك في ذلك الوقت استناداً إلى النظرية الجسيمية للضوء لأنه لا يمكن تخيل طريقة يلتقي فيها جسيمان أو أكثر ويفني أحدهما الآخر، وكانت النظرية الموجية للضوء هي وحدها القادرة على تفسير مثل هذه التجربة[2،53].

4.2 النظرية الكهراطيسية (Electromagnetism Theory):

تُعتبر النظرية الكهراطيسية من أهم أعمال الفيزيائي الاسكتلندي جمس مكسويل (James Clerk Maxwell) والتي قادت إلى قبول شامل للنظرية الموجية للضوء مع بعض التطورات والتوضيحات حول الطبيعة الموجية للضوء .بين مكسويل عام 1873 أن الضوء هو موجة كهراطيسية عالية التواتر مؤلفة من حقلين كهربائي ومغناطيسي متعامدين فيما بينهما و يتعامدان مع منحى الانتشار ولهما التواتر نفسه. تنتشر الموجة الكهراطيسية في الخلاء بسرعة ثابتة هي سرعة الضوء في الخلاء وهي لا تحتاج إلى وسط تنتشر فيه وهذا ما دعا إلى التخلي عن فكرة وجود وسط يدعى بالأثير، في عام 1878 قدم هرتز(Hertz) برهاناً تجريبياً على صحة نظرية مكسويل الكهراطيسية عندما قام بإصدار واستقبال الأمواج الكهراطيسية[2،53].

5.2 نظرية تكميم الضوء (Light Quantization Theory):

على الرغم من أن النظرية الكهراطيسية كانت قادرة على تفسير معظم الخواص والظواهر المعروفة للضوء من انعكاس وانكسار وانعراج وتداخل إلا أنها عجزت عن تفسير بعض الحوادث التي تم ملاحظتها مؤخراً أثناء بعض التجارب والتي كان من أكثرها دهشةً المفعول الكهروضوئي الذي اكُتشف من قبل هرتز. لاحظ هرتز أنه عند سقوط الضوء على سطح معدن فإن من الممكن أن يتم اقتلاع بعض الالكترونات من سطح المعدن. دلت التجربة أن الطاقة الحركية للإلكترون المقتلع مستقلة عن شدة الإشعاع الساقط على سطح المعدن وتعتمد على تردد هذا الإشعاع وهذا ما يتعارض مع النظرية الموجية للضوء التي تنص على أنه يجب أن تكون الطاقة الممنوحة للإلكترون كبيرة بقدر ما تكون شدة الإشعاع كبيرة. إن تفسير المفعول الكهروضوئي قدمه أينشتاين (Einstein)عام 1905 ضمن نظرية استخدمت مفهوم التكميم الذي كان قد طرحه الفيزيائي الشهير ماكس بلانك (Max Planck) عام 1900.

يفترض النموذج الكمي أن دفق الشعاع الكهرطيسي ذا التردد υ يتألف من كمات متقطعة من الطاقة يعطى كل منها بعلاقة بلانك ($E = h\upsilon$) حيث h ثابت بلانك. هذه الكمات هي أصغر كمية من الطاقة يمكن أن توجد مستقلة في الشعاع ويمكن أن تتفاعل مع المادة كوحدة مستقلة، وقد دعيت هذه الكمات من الطاقة بالفوتونات(Photons). يجب أن ينظر إلى الضوء على أنه ذو طبيعة مزدوجة فهو لا يمتلك خصائص موجية فقط وإنما يمتلك أيضاً خصائص جسيمية وهو يتصرف أحياناً كموجة وأحياناً أخرى كجسيم[2،53].

3. المصادر الكلاسيكية (الحرارية) للضوء:

إذا لمسنا جسمًا بيدنا فقد نشعر إذا كانت درجة حرارته عالية بإحساس دافئ، هذا هو نفس الإحساس الذي نشعر به إذا كنا قريبين من دون لمسه لأن الحرارة تنتقل عبر الهواء ومع ذلك، حتى إذا أزلنا كل الهواء المحيط بالجسم، فلا يزال انتقال الحرارة يحدث.

نعلم اليوم أن الجسم ينقل حرارته، أي طاقته جزئياً على شكل موجات كهرومغناطيسية. الموجات التي تنقل الجزء الأكبر من الطاقة والمسؤولة عن الإحساس الدافئ تحمل اسم "الأشعة تحت الحمراء". لها أطوال موجية تمتد تقريبًا في النطاق الكامل بين المليمتر والألف من المليمتر (ميكرون) وغير مرئية لأعيننا. ومع ذلك ، فإن الطاقة المنقولة بواسطة الضوء المرئي من الشمس عبر ملايين الكيلومترات قد تتحول أيضًا إلى حرارة. للتلخيص قد نقول أن الجسم الساخن يبعث طاقة في الفضاء المحيط بشكل جزئي على شكل إشعاع. مع ارتفاع درجة حرارته، يشع الجسم كمية متزايدة من الطاقة بينما ينقص الطول الموجي للإشعاع المنبعث من منطقة الأشعة تحت الحمراء إلى المنطقة المرئية. عند درجة حرارة حوالي ألف درجة يبدو الجسم محمرًا، كلما زادت درجة الحرارة أكثر، تفترض لونًا كثيفًا بشكل تدريجي يمر من الأحمر إلى الأصفر، وفي النهاية الأزرق[2].

تم اكتشاف العلاقة الدقيقة الموجودة بين لون الجسم ودرجة حرارته في القرن التاسع عشر من خلال سلسلة من القياسات والحسابات التي تعتمد جميعها في البداية على الديناميكا الحرارية.

في بداية القرن التاسع عشر، كان الباحثون مهتمين إلى حد كبير بالطريقة التي يبعث بها الجسم الساخن الإشعاع لعدد من الأسباب، من بينها رغبتهم في إنشاء مصادر ضوئية فعالة في وقت كانت فيه إضاءة المدن بالغاز والكهرباء فقط في البداية. علاوة على ذلك كانت دراسة الضوء المنبعث من النجوم في ذلك الوقت الطريقة الوحيدة للحصول على معلومات حول طبيعتها[2].

1.3 الاجسام السوداء:

عندما يكون الإشعاع الكهرومغناطيسي في حجرة معزولة حراريا، أو تجويف في حالة توازن حراري عند درجة حرارة T، فإن توزيع كثافة الإشعاع $\rho(\nu)\, d\nu$ ، الموجود في النطاق الترددي dν، يُعطى بموجب قانون بلانك:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \qquad (1.1)$$

حيث $\rho(\nu)$ هي كثافة الطاقة الإشعاعية لكل وحدة تردد ($J\ s\ /\ cm^3$)، k هي ثابت بولتزمان، و c هي سرعة الضوء. يتلاشى التوزيع الطيفي لطاقة الإشعاع الـحراري عند $\nu = 0$ و $\nu \longleftarrow +\infty$، ولها ذروة، والتي تعتمد على درجة الحرارة.

الأجسام الساخنة وغير الشفافة والغازات الكثيفة تتصرف كأجسام سوداء و تشع الطاقة وفقًا لقانون ستيفان:

$$M = \varepsilon\sigma T^4 \qquad (2.1)$$

حيث M: هي التدفق الاشعاعي الكلي (اجمالي الطاقة المشعة لكل وحدة مساحة) the radiant emittance.

σ: ثابت ستيفان بولتزمان و يساوي $5.67x\ 10^{-8}\ W.\ m^{-2}.\ K^{-4}$.

ε: هي انبعاثيه سطح المادة the emissivity of the surface و تعرف بالنسبة بين الطاقة المنبعثة من سطح المادة الى الطاقة المنبعثة من الجسم الاسود عند درجة الحرارة نفسها، و تتراوح بين 0 و 1 حيث تساوي 1 للجسم الاسود و تكون اقل من 1 لكل الاجسام الحقيقية وتختلف قليلاً مع درجة الحرارة وطول الموجة.

توضح **الصورة. 1.1** أطياف الأجسام السوداء عند درجات حرارة مختلفة، $M_\lambda(T)$ هو الانبعاث الإشعاعي لكل وحدة طول موجي عند درجة الحرارة T. تظهر عدة أشياء من الشكل. يشع الجسم الأسود الساخن المزيد من الطاقة عند كل طول موجي من الجسم الأكثر برودة. بالإضافة إلى ذلك يقع معظم الإشعاع في الجزء تحت الأحمر من الطيف للأجسام السوداء عند درجات حرارة أقل من بضعة آلاف كلفن. (يمكن تسخين جسم ما لتوهج أحمر باهت عند حوالي 500 كلفن أو نحو ذلك. الأجسام الباردة نسبيا تشع بالكامل في الأشعة تحت الحمراء، على سبيل المثال الأجسام في درجات الحرارة المحيطة النموذجية، مثالا 300 كلفن، لديها أقصى انبعاث إشعاعي في جوار 10μm الغلاف الجوي شفاف إلى حد كبير في هذه المنطقة من الطيف ونتيجة لذلك فإن من 8 μm إلى 14 μm من منطقة الطول الموجي هي مهم في بعض التطبيقات مثل الاستشعار عن بعد لنمو المحاصيل وتلوث المياه وما إلى ذلك[52].

يتم وصف تحول طيف الجسم الأسود نحو أطوال موجية أقصر عند درجات حرارة أعلى من خلال قانون الإزاحة لفيين:

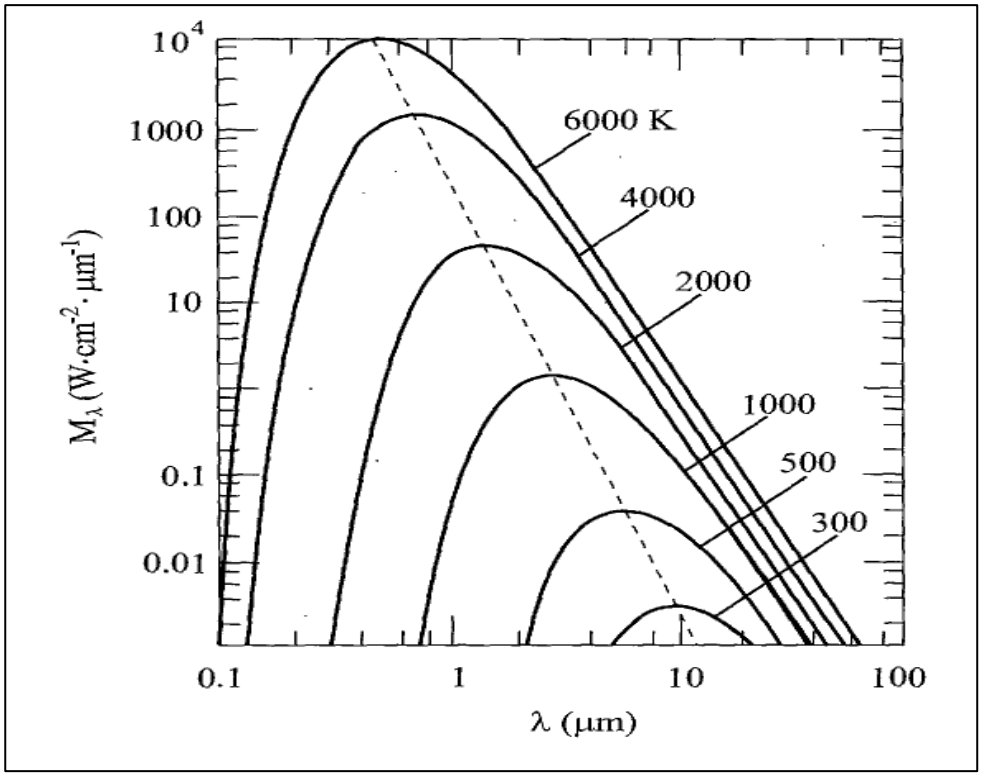
$$\lambda_m T = 2898\mu m.k \qquad (3.1)$$

حيث: λ_m هو الطول الموجي الذي يكون عنده الانبعاث الاشعاعي اقصى ما يمكن.

يتم وصف المنحنيات في **الصورة. 1.1** بدقة من خلال قانون بلانك والذي يكتب عادة من بدلالة التردد υ ($\upsilon=c/\lambda$) وينص على أن الانبعاثات المشعة الطيفية لجسم أسود حقيقي هو[52]:

$$M_\nu(T) = \frac{2\pi\nu^4}{c^3}\ \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1} \qquad (4.1)$$

حيث : $h=6.626\ x\ 10^{-34}J.s$ ثابت بلانك.



الصورة. 1.1 - الانبعاث الإشعاعي الطيفي لأجسام سوداء لها درجات حرارة مختلفة[52].

2.3 مصادر الخط (Line Sources):

تعتبر الغازات المتوهجة التي لا يوجد فيها تفاعل كبير بين الذرات أو الأيونات أو الجزيئات المستثارة أمثلة جيدة على مصادر إشعاع الخط. مصابيح النيون ومصابيح الصوديوم والزئبق منخفضة الضغط هي مصادر من هذا القبيل **الجدول. 1.1**.

الجدول. 1.1 - اهم الخطوط الطيفية [52].

Wavelength [nm]	Element[a]	Wavelength [nm]	Element[a]
768.2	K	471.3	He
670.8	Li	486.1	H (F)
667.8	He	467.8	Cd
656.3	H (C)	447.1	He
643.8	Cd	443.8	He
589.6; 589.0	Na (D)	438.9	He
587.6	He	435.8	Hg
579.1	Hg	434.0	H
577.0	Hg	430.8	Fe (G)
546.1	Hg	410.2	H
527.0	Fe (E)	407.8	Hg
508.6	Cd	404.7	Hg
504.8	He	396.8	Ca (H)
501.6	He	393.4	Ca (K)
492.2	He	365.0	Hg
491.6	Hg	253.7	Hg
480.0	Cd		

في مصابيح التفريغ الغازية، يتم تمرير التيار الكهربائي عبر غاز مؤين جزئيًا. في بعض الأحيان يضرب إلكترون حر ذرة ويرفعها إلى مستوى طاقة أعلى، سرعان ما تنخفض الذرة إلى مستوى طاقة أقل، غالبًا عن طريق آلية انبعاث ما يكفي من الإشعاع الكهرومغناطيسي لضمان الحفاظ على الطاقة. وهذا ما يسمى الانبعاث التلقائي[52].

يتم تحديد تردد الإشعاع من خلال اختلاف الطاقة بين المستويين. إذا كان فرق الطاقة هو ΔE، فإن التردد υ للإشعاع المنبعث يكون هكذا:

$$h\nu = \Delta E \qquad (5.1)$$

طالما أن ذراتها في حالة توازن حراري مع محيطها، لا يمكن أن يتجاوز مشعاع الخط المكثف مطلقًا الابتعاث الطيفي $M_\lambda(T)$ لجسم أسود عند نفس درجة حرارة مصادر الخط. أي أن انبعاثية مصادر خط لا يمكن أن تتجاوز 1. يتم كسر هذه القاعدة فقط من خلال مصادر الليزر، التي لا تكون ذراتها في حالة توازن حراري مع محيطها[52].

الخطوط الطيفية المنبعثة من ذرة ثابتة ومعزولة حادة للغاية. بالنسبة لمعظم الأغراض العملية، يمكن القول أن الذرة تنبعث منها إشعاع أحادي اللون (أي تردد واحد أو طول موجة فقط).

تحوي الخطوط الطيفية المنبعثة في الغاز الحقيقي مجاميع من الاطياف الخطية العريضة منها و الحادة. اضافة الى ذلك ربما تحوي طيفا مستمرا ذات شدة اقل من شدة الاطياف الاخرى. و تعتمد ترددات هذه الخطوط الطيفية المنبعثة على مكونات الغاز المستخدم. واما شدة الخطوط و كذلك اتساعها فيعتمدان على عدة عوامل، كالضغط و درجة الحرارة و الطريقة المستخدمة لإثارة الغاز و تأثير دوبلر و الالكترونات الحرة. اضاءة الغاز باعتباره مصباحا تكون ضعيفة. عندما يكون الغاز ساخنًا بما فيه الكفاية وكثيفة بما فيه الكفاية، تصبح السلسلة متصلة، وتصبح الخطوط الطيفية واسعة جدًا بحيث تبدأ في التداخل. عندما يحدث هذا، يصبح الطيف أشبه بمشع الجسم الأسود أكثر من طيف مصدر الخط. كلما كان الغاز أكثر حرارة وكثافة ، كلما اقترب أكثر من الجسم الأسود[52].

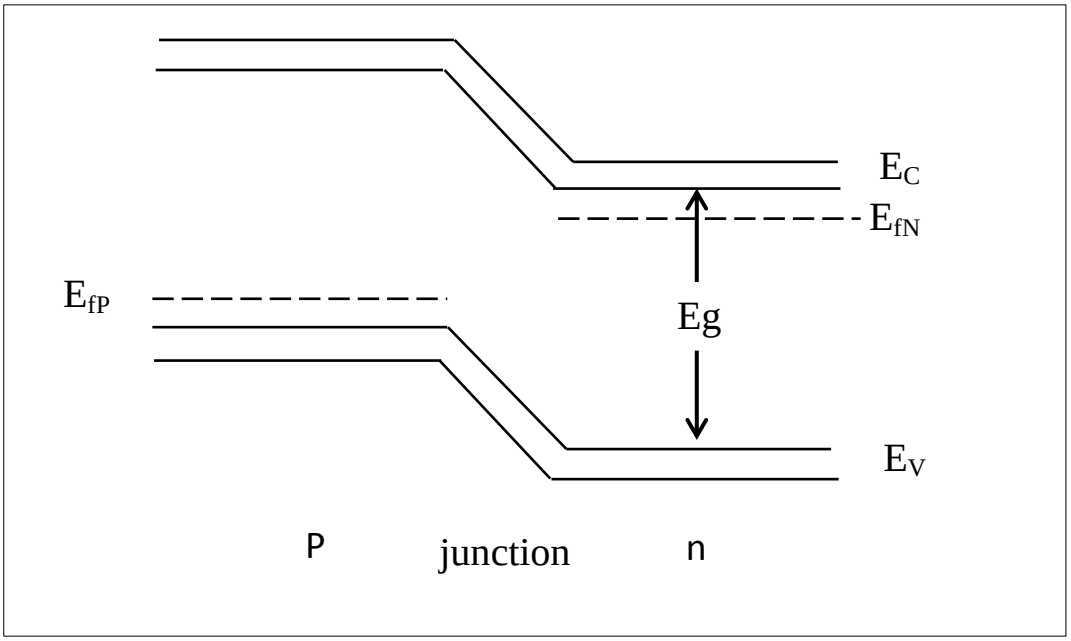
3.3 الثنائيات الباعثة للضوء (LED):

الصمام الثنائي الباعث للضوء أو LED هو نوع جديد نسبيًا من مصدر الضوء وقد شهد تطبيقًا كبيرًا في شاشات العرض الرقمية وشاشات أخرى. بسبب صغر حجمها ومتطلبات الطاقــة المنخفضة، لها أيضًا قيمــة كبيرة في الاتصـــــالات البصرية وأجهزة الكمبيوتر.

في الأساس يتكون LED من وصلة بين أشباه الموصلات من النوع p والنوع n المطعمة بشكل كبير، مثل

زرنيخ الجاليوم. تحتوي أشباه الموصلات من النوع n على العديد من الإلكترونات عالية الحركة، في حين تحتوي المواد من النوع p على ثقوب موجبة أقل حركة. عندما يتم ربط مادتين من هذه المواد ، فإن الشحنات المتنقلة تعيد توجيه نفسها حتى تنتج بنية مستويات الطاقة المبينة في **الصورة. 2.1** يتميز الهيكل بشريطين، أحدهما فوق الآخر والآخر أسفل الفجوة الممنوعة المسماة E_g. لا يُسمح للإلكترونات أو الثقوب أن يكون لها طاقات تقع داخلها.

في درجات الحرارة المنخفضة، تمتلك جميع الإلكترونات تقريبًا طاقات أقل من مستوى فيرمي E_f الذي يشير إليه الخط المتقطع. تشير المناطق المظللة أسفل E_f إلى وجود الإلكترونات، اما الإلكترونات فوق الفجوة الممنوعة متحركة وتعرف باسم إلكترونات التوصيل. تشير المنطقة غير المظللة في المادة من النوع p فوق E_f مباشرة إلى غياب الإلكترونات أو وجود ثقوب[52].



الصورة. 2.1 - مستوى الطاقة للديود الباعث للضوء.

لا يمكن للإلكترونات التوصل أن تشغل الثقوب في المادة من النوع p، لأنها مفصولة ماديا بعرض الوصلة. إذا تم تطبيق جهد خارجي V، يمكن جذب إلكترونات التوصيل نحو المادة من نوع p. إذا كانت المادة من النوع p موجبة وإذا كان انخفاض الجهد عبر الوصلة كبيرًا بما فيه الكفاية، فسيتم حقن إلكترونات التوصيل في أو عبر الوصلة. يوضح فحص **الصورة. 2.1** أن الإلكترون يحتاج إلى اكتساب طاقة E_g تقريبًا لعبور الحاجز الكموني في المادة p يجب ان يتحقق الشرط:

$$eV \geq E_g \qquad (6.1)$$

الإلكترون الآن حر في الخضوع لانتقال عبر الفجوة الممنوعة والاندماج مع الفجوات. في مواد أشباه الموصلات المناسبة، يؤدي هذا إلى انبعاث الضوء.

تتوفر مصابيح LED بشكل شائع في المناطق القريبة من الأشعة تحت الحمراء والحمراء من الطيف، تم صنعها بأطوال موجية قصيرة مثل الضوء الأزرق[52].

4. خواص الضوء الصادر من المنابع الكلاسيكية (غير الليزرية):

يشع الضوء من المصادر المذكورة آنفا في جميع الاتجاهات و تملأ الاشعة المنبعثة من سطح صقيل لجسم صلب متوهج زاوية صلبة مقدارها $2\pi(sr)$ (طبعا لا تكون الشدة متجانسة بل تخضع لقانون لامبرت "الذي ينص على أنَّ شدة الضوء المار خلال عينة يتناقص حسب تركيزها وسماكتها ضمن الطول الموجي المحدد"). و لإنتاج حزمة متوازية من الأشعة المنبعثة من المصادر المذكورة أعلاه، يكون من الضروري وضع المشع في المستوى البصري للجهاز البصري. و لكن بمأن المصدر ذو حجم محدود، فالحزمة الناتجة سوف لا تكون متوازية، و لكن سيكون هناك تشتت زاوي مساويا للحجم الزاوي للمصدر منظورا من احد المستويات الرئيسية للجهاز البصري. لكي نحصل على حزمة حادة، نستعمل فقط جزءا صغيرا من المصدر الممتد، بالإضافة الى كل ما ذكر، فأنه لا يمكن استخدام كل الطاقة المنبعثة من هذا المصدر شبه النقطي و ذلك بسبب فتحة الجهاز البصري التي تعمل كمانع فعال يمحي جزءا كبيرا من الأشعة. و من هذا يتبين بأنه لا يمكن تحويل إلا جزءا صغيرا من الطاقة المنبعثة من المصدر الضوئي الاعتيادي إلى حزمة متوازية تقريبا. و كلما كانت حاجتنا إلى توازي الأشعة أكثر، كان المتوفر من الطاقة اصغر.

و يمكن استخدام مجاميع من المرايا و العدسات لتوجيه الأشعة المنبعثة من المصدر والساقطة على جسم ما. و بهذا الأسلوب يكون من الممكن تركيز الضوء على حاجز و ربما يكون بمقدورنا أن نبتكر جهاز بصري بإمكانه خلق صورة على سطح ما، تكون إضاءتها اكبر بكثير من إضاءة المصدر الممتد نفسه. و من مفهومنا الحالي، هذا يعني بأن كثافة الدفق الضوئي عند الصورة هي أعلى من الكثافة الموجودة عند المصدر، و لكن هناك نظرية معروفة في البصريات التقليدية لا تسمح بحدوث هذه الظاهرة و بعبارة أدق لا يمكن إحداثه بمشعات تخضع لقانون لامبرت (انظر الفقرة 2.8 من هذا الفصل) إذا كانت الأوساط التي يتواجد فيها كل من المصدر و الصورة تمتلك نفس معامل الانكسار.

و ضمنيا يعتبر سريان قانون لامبرت و نتائجه، صفة أساسية مشتركة في جميع المصادر الضوئية غير المصادر الليزرية، فلو انتقينا ضوء من جزئيين مختلفين لمصدر ضوئي اعتيادي و استخدمنهما في إنارة منطقة معينة من شاشة، فسوف لا يكون بالإمكان رؤية ظاهرة التداخل بينهما، لأن الأجزاء المختلفة من المصدر الضوئي نفسه تشع بطريقة غير مترابطة اتجاهيا (incoherently)، يعني من دون علاقة طور ثابتة[54].

يمكننا تلخيص الحدود الرئيسية للمصادر الضوئية التقليدية كما يلي:

- تتوزع الطاقة المنبعثة من مصدر شديد على مدى منطقة عريضة نسبيا من الطيف.

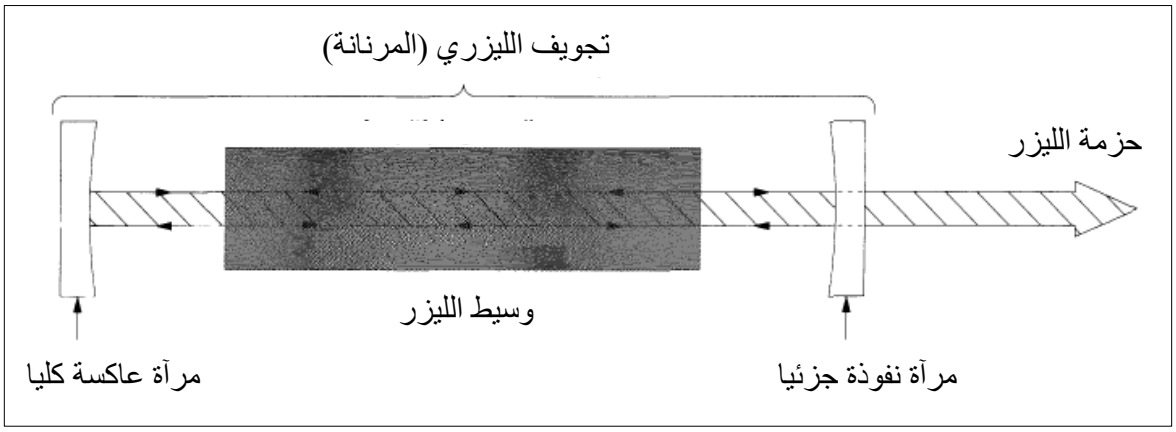
- يصعب عادة تسديد الطاقة المشعة باتجاه معين، و الحزمة المسددة لا يمكن تحسينها إلا على حساب شدة الضوء المتوفرة.
- لا يمكن إسقاط الأشعة الصادرة من مصدر ممتد لتكوين صورة يرافقها زيادة في الإضاءة.

5. الليزرات (Lasers):

1.5 تعريف الليزر:

كلمة ليزر (LASER) هي اختصار (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) اي تضخيم الضوء عن طريق الانبعاث المحث للإشعاع. يستخدم الليزر العمليات التي تزيد أو تضخم الإشارات الضوئية بعد توليد تلك الإشارات بوسائل أخرى. تتضمن هذه العمليات الانبعاث المُحث وهو تأثير تم استنتاجه من خلال الاعتبارات المتعلقة بالتوازن الديناميكي الحراري، والتغذية الراجعة البصرية (الموجودة في معظم أنواع الليزر) التي يتم توفيرها عادةً بواسطة المرايا. وهكذا في أبسط أشكاله، يتكون الليزر من وسط كسب أو تضخيم (حيث يحدث انبعاث محث) ومجموعة من المرايا لتغذية الضوء مرة أخرى إلى المكبر من أجل استمرار نمو الحزمة النامية، كما هو موضح في **الصورة. 3.1** [55].

يمكن اعتبار الليزر مجرد نوع آخر من مصادر الضوء. لكن من المؤكد أن له العديد من الخصائص الفريدة التي تجعله مصدرًا خاصًا للضوء.



الصورة. 3.1 - مخطط بسيط نموذجي لليزر[55].

استفاد تشارلز تاونز (Charles Townes) من عملية الانبعاث المحث لبناء مضخم الميكروويف، المشار إليه باسم مازر(maser). أنتج هذا الجهاز حزمة متماسكة من الموجات الدقيقة لاستخدامها في الاتصالات. تم إنتاج المازر الأول في بخار الأمونيا. في عام 1958، نشر Townes and Schawlow ورقة بحثية تتعلق بأفكارهم حول توسيع مفهوم maser إلى الترددات الضوئية.

اقترح الطـــالب جوردون جـــولد (Gordon Gould) فـي سنة 1959 المتخرج من جـــامعة كولومبيا[2] أن الانبعاثات المحثة يمكن استخدامها لتضخيم الضوء. وهو يصف مرنان بصري يمكن أن يخلق شعاع ضيق من الضوء المتماسك، وسماه "الليزر" اختصارًا لـ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"أو "تضخيم الضوء عن طريق الانبعاثات المحثة للإشعاع."

في عام 1960، أنتج ثيودور ميمان (Theodore Maiman) من مختبرات أبحاث هيوز (Hughes) أول ليزر باستخدام بلورة الياقوت كمضخم ومصباح وميضي كمصدر للطاقة. أحاط المصباح الوميضي الحلزوني ببلورة ياقوتية على شكل اسطوانة، وتم تشكيل التجويف البصري من خلال طلاء الأطراف المسطحة لأسطوانة الياقوت بمادة عاكسة للغاية. لوحظ شعاع أحمر شديد يخرج من نهاية القضيب عند إطلاق المصباح[55].

كان التشغيل الناجح لأول ليزر من قبل Theodore Maiman بمثابة المفتاح للخزانة المليئة بأنواع اخرى من الليزرات التي تنتظر الاكتشاف، ستة سنوات فقط تم تشييد نماذج ليزرية عاملة من الغازات و المواد الصلبة و السائلة و كذلك اشباه الموصلات، التي حفزها انجاز ميمان، وبحلول ذلك العقد تم العثور على مئات المواد القادرة على احداث الفعل الليزري.

يهدف الجزء "الليزرات"، إلى تقديم المصطلحات والمفاهيم المتعلقة بالليزرات والرنانات الضوئية. يبدأ بمناقشة دراسة تفاعل المادة مع الإشعاعية ، وأبسط مثال على ذلك هو تفاعل الذرة مع الإشعاع. العمليات المعنية هي الانبعاث والامتصاص والتي تم وصفها من خلال دراسة انتقالات النظام بين حالتين، ثم وصف الرنانات الضوئية، أنماط الليزر، أو أنماط الإشعاع المسموح بها، وانتشار الحزم الغاوسية ويختتم هذا الجزء بمناقشة خصائص حزمة الليزر ثم التطرق لأهم أنواع الليزر الصلبة و كذلك تطبيقات الليزر.

6. إحصائية بولتزمان (Boltzmann's Statistics):

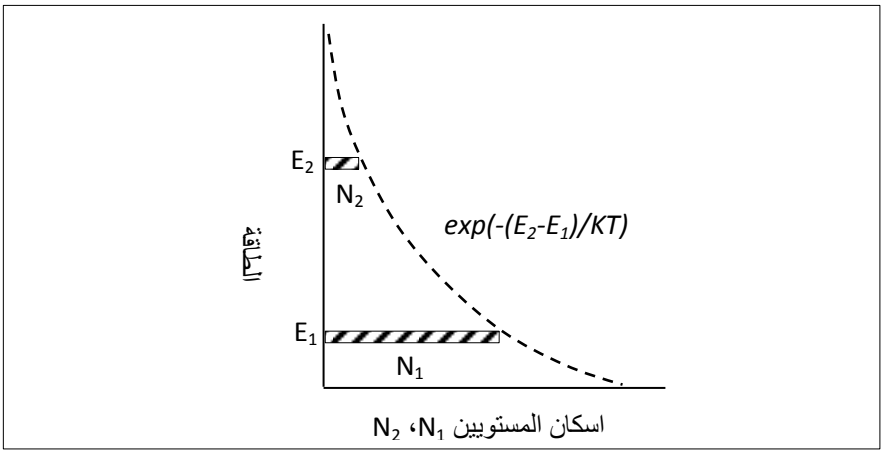
وفقًا للمبدأ الأساسي للميكانيكا الإحصائية، عندما يكون عدد كبير من الذرات المتماثلة في حالة توازن حراري عند درجة الحرارة T، يجب أن تكون الاسكان النسبي لمستويي الطاقة E_1 و E_2، كما هو موضح في **الصورة. 4.1**، مرتبطة بعلاقة Boltzmann[4] :

$$\frac{N_2}{N_1} = exp(\frac{-(E_2-E_1)}{K_B T}) \qquad (7.1)$$

حيث N_1 و N_2 عدد الذرات في مستويات الطاقة المعينة E_1 و E_2.

و بالتالي :

$$N_1 + N_2 = N_{tot} \qquad (8.1)$$



الصورة. 4.1 - الاسكان النسبي لمستويين من الطاقة المعطى بعلاقة بولتزمان [4].

بالنسبة لفارق الطاقة الكبيرة بما يكفي ($\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{21} \gg k_B T$)، تكون النسبة تقريبًا معدومة، وسيكون هناك عدد قليل جدًا من الذرات في مستوى الطاقة أعلى من 2 عند التوازن الحراري. الطاقة الحرارية k_BT عند درجة حرارة الغرفة $(T= 300K)$ تتوافق مع فرق الطاقة $\Delta E = h\nu$ مع $\nu = 6.10^{12}Hz$، وهو ما يعادل طول موجة عند $\lambda = 50\ \mu m$. لذلك بالنسبة لأي فرق في الطاقة يكون تردده الانتقالي ν_{21} ينتمي إلى المناطق القريبة من الأشعة تحت الحمراء أو المناطق المرئية ، سيكون أس بولتزمان صغيرًا جدًا في درجات الحرارة العادية. سيكون عدد الذرات في أي مستوى للطاقة أعلى صغيرًا جدًا مقارنةً بالمستويات الأقل[4].

المعادلة (7.1) صالحة للأنظمة الذرية ذات المستويات غير المتوالدة فقط. إذا كانت هناك g_i حالات مختلفة للذرة تقابل الطاقة Ei، فعندئذٍ يتم تعريف g_i على أنها درجة توالد مستوى الطاقة i.

إن الأنظمة الذرية، مثل الذرات والأيونات والجزيئات، يمكن أن توجد فقط في حالات مستقرة معينة، كل منها يتوافق مع قيمة محددة للطاقة، وبالتالي تحدد مستوى الطاقة معين.

عندما يكون لحالتين أو أكثر نفس الطاقة، فإن المستوى المعني يسمى متوالد، وعدد الحالات التي لها نفس الطاقة هي كثرة المستوى. سيتم أيضًا ملء جميع الحالات التي لها نفس مستوى الطاقة، وبالتالي فإن عدد الذرات في المستويين 1 و 2 هو $N_1= g_1 N'_1$ و $N_2= g_2 N'_2$ يتعلق بالإسكان في أي حالة في المستويين 1 و 2 على التوالي. ويتضح من المعادلة (7.1) أن تجمعات مستويات الطاقة 1 و 2 مرتبطان بالصيغة:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2 N'_2}{g_1 N'_1} = \frac{g_2}{g_1} exp(\frac{-(E_2-E_1)}{K_B T} \qquad (9.1)$$

عند درجة حرارة الصفر المطلق، تتنبأ إحصائية بولتزمان بأن جميع الذرات في الحالة الأرضية. يتطلب التوازن الحراري عند أي درجة حرارة أن تكون الحالة ذات الطاقة المنخفضة أكثر كثافة سكانية من الحالة ذات الطاقة العالية[4].

وبالتالي، فإن النسبة N_2/N_1 تكون دائمًا أقل من الوحدة من اجل $E_2 > E_1$ و $T > 0$. هذا يعني أن التضخيم البصري عند التوازن الحراري غير ممكن.

7. تفاعل الضوء مع المادة ومعاملات أينشتاين (Einstein Coefficient):

بحث موضوع تفاعل الضوء مع المادة منذ عام 1861 أثناء دراسة العالمين بنزن وكرشوف (Bunsen & Kirchhoff) لتفاعل الأشعة الضوئية الواردة من الشمس مع الغلاف الجوي وكانت هذه الدراسة تهدف إلى تفسير مشاهدة العالم فرانهوفر (Fraunhofer) خطوطاً سوداء في الطيف المنبعث من الشمس. يعتبر أينشتاين أول من قدم دراسة كاملة كشفت طبيعة تفاعل الضوء مع المادة[2].

من المعروف جيدا، أن الانظمة او المنظومات الذرية، كالذرات و الايونات و الجزيئات، بإمكانها ان تتواجد في حالات ساكنة معينة، يناظر كل منها قيمة محدد من الطاقة. و تميز هذه الحالات بأرقام كمية. و اما قيم الطاقة العددية فتدعى بمستويات المنظومة الذرية. فعندما تمتلك اثنتين او اكثر من الحالات نفس الطاقة، فإن ذلك المستوى يدعى مستوى منحل (degenerate)، و يكون العدد من الحالات التي تمتلك الطاقة نفسها هو بمثابة كثرة المستوى (multiplicity of the level). وغالبا ما نستخدم الكلمة حالة (state) لتعني مستوى.

يمكن ان تحدث الانتقالات (transitions) فيما بين الحالات المستقرة مصحوبة بانبعاث او امتصاص طاقة على شكل اشعة، او بانتقال الطاقة من او الى منظومة اخرى و اذا كان الانتقال اشعاعي، فإن تردد الاشعة المبتعثة او الممتصة من قبل المنظومة تعطى بالعلاقة الترددية لبور(Bohr) العلاقة (10.1) [54]:

$$h\nu = E_2 - E_1 \qquad (10.1)$$

حيث E_1 و E_2 هما طاقات الحالات التي حدث وسطهما الانتقال و الثابت h هو ثابت بلانك.

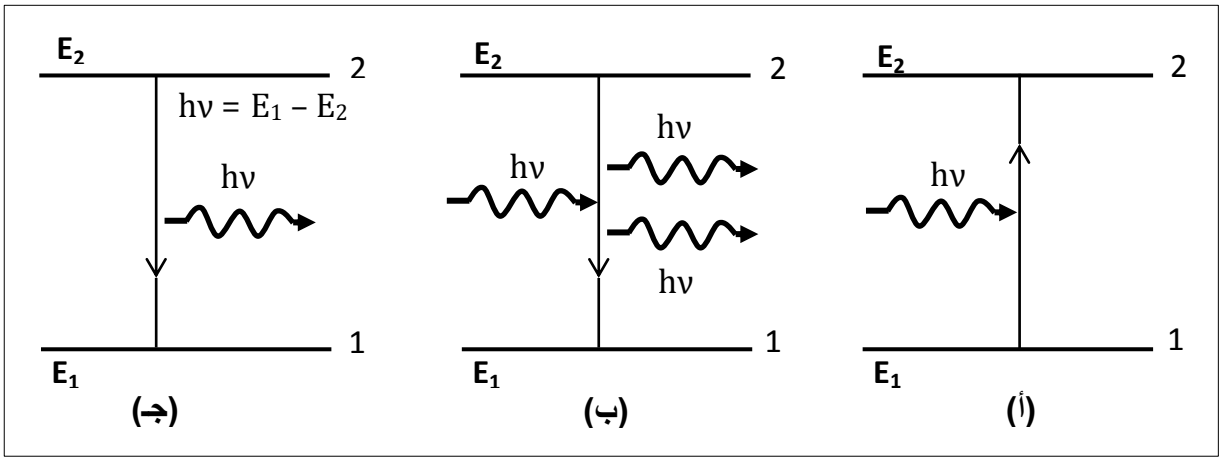
يدعى مستوى المنظومة الذي يمتلك اقل طاقة بمستوى الهمود او المستوى الارضي (ground level) بينما يدعى اي مستوى آخر بمستوى تهيج (excited level) [54].

وضح أينشتاين ثلاث عمليات يمكن للضوء من خلالها أن يتفاعل مع هذه الجملة و هذه العمليات هي:

1.7 امتصاص الاشعاع (Absorption):

تبين **الصورة. 5.1** (أ) جملة تتألف من سويتين طاقيتين من سويات الطاقة لمادة معينة: E_1 و E_2 و لنفترض ان $E_1<E_2$ وهاتان السويتان يمكن ان تكون اي سويتين من مجموعة سويات الطاقة الكثيرة و غير المحدودة للمادة. و مع ذلك فمن المناسب اختيار السوية (1) لتكن السوية الارضية، و لنفترض ان ذرة او جزيئة المادة موجودة في البداية في السوية (1)، فإن المنظومة ستبقى في هذه الحالة ما لم يطبق عليها مؤثر خارجي. فعند ورود موجة

كهرومغناطيسية ترددها $\upsilon = \upsilon_0$ على المادة تصبح هناك احتمالية لكي ترتفع الذرة الى السوية (2). تحصل الذرة على الطاقة التي تحتاجها و هي $E_2 - E_1$ من طاقة الموجة و تسمى هذه العملية بعملية الامتصاص[56].



الصورة. 5.1 - مخطط توضيحي لعمليات تفاعل المادة مع الاشعاع (أ) عملية الامتصاص – (ب) عملية الاصدار المستحث(القسري) – (جـ) عملية الاصدار التلقائي[56]

يعرف معدل الامتصاص W_{12} بالمعادلة:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_a = -W_{12}N_1 \qquad (11.1)$$

حيث إن $(dN_1/dt)_a$ هو معدل الانتقالات 1 الى 2 العائدة للامتصاص و N_1 هو اسكان السوية 1 و هو يمثل عدد الذرات (في وحدة الحجم) الموجودة في زمن معين فيها. ونستطيع كتابة المعادلة:

$$W_{12} = \sigma_{12}F \qquad (12.1)$$

حيث F تمثل تدفق الفوتونات للموجة الواردة و σ_{12} مساحة مميزة (للمقطع العرضي للامتصاص) التي تتوقف على الانتقال المعين[56].

2.7 الاصدار التلقائي (Spontaneous emission) :

لنفترض الآن ان ذرة او جزيئة المادة موجودة في السوية (2) **الصورة. 5.1** (جـ) و بما أن $E_1 < E_2$ فالمنظومة سوف تميل للعودة الى السوية (1) و تحرر طاقة قيمتها $E_2 - E_1$. عندما تكون الطاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية، يطلق على العملية بالإصدار التلقائي (أو الإشعاعي) و يتحدد تردد الموجة الصادرة بعلاقة بلانك التالية:

$$\nu_0 = \frac{(E_2 - E_1)}{h} \qquad (13.1)$$

حيث h ثابت بلانك.

و لهذا فالإصدار التلقائي يتميز بإصدار فوتون ذي طاقة $h\nu_0 = E_2 - E_1$ الاصدار الاشعاعي هو احد الاحتمالين لتعود الذرة الى السوية (1)، ذلك ان العودة يمكن ان تحدث بطريقة غير مشعة. اين يتحرر فرق الطاقة بأشكال أخرى غير الموجات الكهرومغناطيسية.

تتناسب احتمالية حدوث عملية الإصدار التلقائي من انحلال السوية العليا $(dN_2/dt)_{sp}$ بطبيعة الحال مع N_2 اسكان السوية (2)، و لذلك نستطيع كتابة المعادلة:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{SP} = -AN_2 \qquad (14.1)$$

المعامل A يدعى معدل الإصدار التلقائي او معامل A لأينشتاين (Einstein A coefficient)

و تعطى مدة حياة الاصدار التلقائي أو مدة حياة الإشعاع بالعلاقة:

$$\tau_{sp} = \frac{1}{A} \qquad (15.1)$$

و بالتشابه من اجل الانحلال غير المشع، نكتب بشكل عام:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}} \qquad (16.1)$$

حيث τ_{nr} مدة حياة الانحلال اللإشعاعي لطاقة السوية[56].

3.7 الاصدار المحث (Stimulated emission):

هناك احتمال ثالث للانتقال ، تنبأ به ألبرت أينشتاين عام 1917. لنفرض الآن ان الذرة في السوية (2) و ان موجة كهرومغناطيسية ترددها يساوي $\upsilon = \upsilon_0$ تردد الموجة الصادرة بشكل تلقائي، **الصورة. 3.1** (ب) و باعتبار ان لهذه الموجة تردد الانتقال الذري ذاته، لذلك توجد احتمالية كاملة لأن يؤثر حقل هذه الموجة قسريا على الذرة لتشرع في الانتقال 2 الى 1. في هذه الحالة يتحرر فرق الطاقة $E_2 - E_1$ على شكل موجة تضاف الى الموجة الواردة. و هذه هي ظاهرة الإصدار المتحرض.

يوجد فرق اساسي بين عملية الإصدار التلقائي و الإصدار المتحرض. في حالة الاصدار التلقائي تصدر الذرات أمواجا كهرومغناطيسية و لا توجد علاقة تربط اطوار هذه الموجات. إضافة لذلك فإن الموجة تصدر في أي اتجاه، لكنها تصدر بشكل مختلف في حالة الإصدار المتحرض باعتبار العملية تمت قسريا بواسطة الموجة الكهرومغناطيسية الواردة مما يؤدي الى إضافة طور الموجة الصادرة إلى طور الموجة الواردة و في نفس الاتجاه

عند الإصدار. اي ان الموجة الصادرة لها نفس التردد و الاتجاه و الاستقطاب كالمـــوجة الاصلية (ترابط مكاني) و تماما نفس الطور والسرعة (ترابط زمني). يمكن وصف عملية الإصدار المتحرض بالمعادلة التالية[56]:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -W_{21}N_2 \qquad (17.1)$$

حيث ان $(dN_2/dt)_{st}$ هو المعدل الذي تتم وفقه الانتقالات $2 \rightarrow 1$ كنتيجة للإصدارات المحث و أن W_{21} هو معدل الإصدار المحث. و خلافا للمعامل A فإن W_{12} لا يتوقف عـــلى الانتقال الخاص و لكن يعتمد عـــلى شدة الموجة الكهرومغناطيسية الواردة. و يعطى المعامل W_{12} ايضا بالمعادلة:

$$W_{21} = \sigma_{21}F \qquad (18.1)$$

حيث F تمثل تدفق الفوتونات للموجة الواردة و σ_{21} هي كمية لها وحدات سطح و تدعى المقطع العرضي للإصدار المحث cross section[56].

4.7 العلاقة بين المعاملات (A, B12, B21):

لدينا:

$$W_{21} = B_{21}\rho(\nu) \qquad (19.1)$$

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu) \qquad (20.1)$$

(B_{12}) و (B_{21}) معاملان ثابتان يدعيان ثابتي B لأينشتاين.

يعتبر المعامل B_{21} هو المتغير المفيد لحدوث الفعل الليزري، بينما المعامل A_{21} يمثل حد الخسارة ويدخل في فوتونات النظام التي لا تتعلق بالطور للمجال الكهربائي لتدفق الفوتون الساقط. وبالتالي تمثل العملية العفوية مصدر ضوضاء في الليزر. إذا جمعنا بين الامتصاص والانبعاث التلقائي والانبعاث المحث، كما هو موضح في العلاقات (11.1) و (14.1) و (17.1) و (19.1) و (20.1)، من أجل تغيير الاسكان بين السويتين العليا (2)

و الدنيا (1) في نموذجنا ذي المستويين، يمكننا الكتابة[4]:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} = B_{21}\rho(\nu)N_2 - B_{12}\rho(\nu)N_1 + A_{21}N_2 \qquad (21.1)$$

من (8.1) عند التوازن الحراري، يجب أن يكون عدد الانتقالات لكل وحدة زمنية من E_1 إلى E_2 مساوياً لعدد الانتقالات من E_2 إلى E_1.

لذلك يمكننا الكتابة:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{\partial N_2}{\partial t} = 0$$

$$N_2 A_{21} + N_2 \rho(\nu) B_{21} = N_1 \rho(\nu) B_{12} \qquad (22.1)$$

الاصدار التلقائي — الاصدار المحث — الامتصاص

باستخدام معادلة بولتزمان (9.1) للنسبة N_2 / N_1، نكتب العلاقة أعلاه كما يلي:

$$\rho(\nu_{21}) = \frac{(A_{21}/B_{21})}{(g_1/g_2)(B_{12}/B_{21})\exp(h\nu_{21}/kT) - 1} \qquad (23.1)$$

بمقارنة هذا العبارة (23.1) مع قانون إشعاع الجسم الأسود (1.1)، فإننا نجد:

$$B_{21} = \frac{g_1 B_{12}}{g_2} \qquad (24.1)$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2 h\nu}{c^3} \qquad (25.1)$$

A_2 و B_{12} و B_{21} تدعى بمعاملات أينشتاين و العلاقات (24.1) و (25.1) تعرف بعلاقات أينشتاين. العامل $(8\pi\nu^2/c^3)$ في (25.1) هو كثافة الانماط pn.

لكن في المواد الصلبة و التي يختلف معامل انكسارها عن الواحد، يجب ان يستعاض عن العلاقة الثانية (25.1) بالعلاقة:

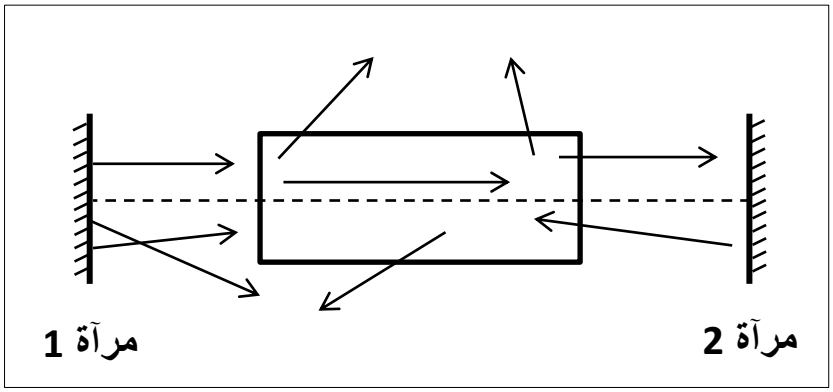
$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3 \eta^3}{c^3} B_{21} \qquad (26.1)$$

بالنسبة لنظام بسيط بدون انحلال، أي $g_1 = g_2$ ، نرى أن $B_{21} = B_{12}$. وبالتالي فإن معاملات أينشتاين للانبعاث والامتصاص المحث متساوية. إذا كان للمستويين انحلال غير متكافئ، فإن احتمال الامتصاص لم يعد هو نفسه بالنسبة للانبعاث المتحرض[4].

8 مبدأ الليزر و تضخيم الإشعاع:

1.8 تضخيم الضوء:

لنفترض أننا حددنا قضيب تضخيم (أو أنبوب غاز أو سائل) بين مرآتين ، كما في **الصورة 6.1.** احدى المرأتين شفافة جزئيًا و كلاهما متوازيتين، و متعامدتين مع محور القضيب. الطــول البصري للتجويف الذي تم تكوينه على هذا النحو هو d، وانعكاسية المرآة هي R، و شدة كسب القضيب هو G.



الصورة: 6.1. مبدأ الليزر[52].

في البداية، الضوء المنبعث هو الذي ينشأ عن الفلورة (التألق) أو الانبعاث التلقائي. كما لاحظنا فإن الانبعاث التفلوري ليس اتجاهيًا، ولكن بعض هذا الضوء سوف ينتقل على طول محور التجويف. توضح المناقشة الاستدلالية التالية كيف يؤدي تضخيم الفلورة إلى انبعاث الليزر[52].

نعتبر حزمة موجية تنبعث على طول المحور بواسطة ذرة واحدة ، تخضع الحزمة لانعكاسات عديدة على المرايا بعد كل رحلة ذهاب و إياب في التجويف، سيتم تضخيمها بمقدار G^2 و خسارة في طاقتها بمقدار R فإذا تجاوز صافي كسبها الواحد (1) اي:

$$G^2R > 1 \qquad (27.1)$$

تنمو الموجة بلا حدود تقريبًا. فقط الأمواج التي تسير بالتوازي مع المحور هي التي تشهد مثل هذا النمو المستمر. والنتيجة هي شعاع اتجاهي قوي. الناتج المفيد لليزر هو الجزء الذي يتسرب من خلال العاكس الجزئي أو مرآة الإصدار.

الشرط الثاني الضروري لليزر. فبالنسبة للحزمة الموجية المنبعثة على طول المحور. طول الترابط أطول بكثير من الطول البصري للتجويف. بمعنى ما فإن الذرة تنبعث منها الحزمة على مدى فترة زمنية محدودة. بسبب الانعكاسات المتعددة، تعود الحزمة عدة مرات إلى الذرة قبل اكتمال البث. إذا عادت الحزمة خارج الطور مع

الموجة التي لا تزال تنبعث من الذرة فسوف تتداخل بشكل مدمر مع تلك الموجة وتنتهي الانبعاث بشكل فعال. يمكننا إذا اخترنا ذلك أن نقول أن هذه الموجة تمت إعادة امتصاصها، ولكن التأثير هو كما لو كانت الموجة غير موجودة اصلا. لذلك فإن الموجات الوحيدة الموجودة هي الموجات التي يحدث لها تداخل بناء:

$$m\lambda = 2d \qquad (28.1)$$

نتيجة للعدد الكبير من الانعكاسات، لا توجد سوى أطوال موجية قريبة من $2d / \lambda$ هناك العديد من هذه الأطوال الموجية داخل عرض الخط التفلوري للمصدر، وبالتالي فإن قيمة d ليست حاسمة على الإطلاق[52].

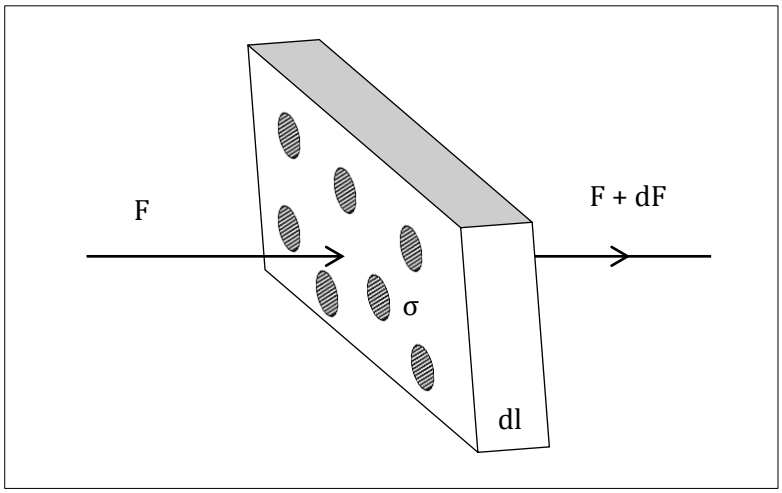
2.8 المضخم البصري:

نعتبر شريحة من مادة بسماكة dl و مساحة A **الصورة. 7.1** تحتوي المادة على ممتصات N_1 لكل وحدة حجم، وكل ممتص يعرض منطقة مستعرضة σ لحزمة الضوء الساقط.

من المناسب أحيانا التفكير في شعاع ضوئي ليس كموجة أو سلسلة من حزم الموجات ولكن كتدفق من الجسيمات المعروفة باسم الفوتونات.

نحن نسمح بتدفق F فوتونا لكل وحدة مساحة و وحدة الوقت للسقوط على الشريحة. يتم امتصاص الفوتون بواسطة الشريحة إذا اصطدم بأحد الممتصات ويتم إرساله إذا لم يحدث ذلك. لذلك فإن جزء F الذي يتم امتصاصه بواسطة الشريحة يساوي جزء المنطقة A الذي تحجبه الماصات اي:

$$\frac{dF}{F} = -\frac{dA}{A} \qquad (29.1)$$



الصورة. 7.1 - حزمة ضوئية بتدفق F تعبر شريحة سمكها dl[52].

اين dA هي المساحة الكلية للماصات، حجم الشريحة يساوي Adl اذن عدد الماصات يعطى بـ N_1Adl، و بالتالي:

$$dA = N_1\sigma Adl \qquad (30.1)$$

إذا كان هناك عدد قليل من الماصات بحيث لا يتداخل أحدها مع الآخر في هذه الحالة:

$$\frac{dF}{F} = -N_1 \sigma dl \qquad (31.1)$$

اذا كاملنا هذه المعادلة على طول قضيب طوله l نجد:

$$F_1(l) = F_0 e^{-N_1 \sigma l} \qquad (32.1)$$

حيث F_0 هو التدفق الابتدائي للفوتونات النتيجة تكافئ قانون لامبرت للبصريات الكلاسيكية.

المقطع العرضي للانبعاث المحث يساوي بالضبط المقطع العرضي للامتصاص. إذا كانت هناك أنظمة مثارة N_2 لكل وحدة حجم فإن:

$$\frac{dF}{F} = +N_2 \sigma dl \qquad (33.1)$$

و بنفس خطوات البرهان السابق نجد:

$$F_2(l) = F_0 e^{+N_2 \sigma l} \qquad (34.1)$$

إذا افترضنا أن بعض الأنظمة الموجودة في المادة موجودة في الحالة واحدة وبعضها في الحالة الأخرى، نستنتج ما يلي:

$$F(l) = F_0 e^{(N_2 - N_1)\sigma l} \qquad (35.1)$$

حسب العلاقة (35.1) توجد امكانية لتضخيم الضوء الساقط على المادة بشرط ايجاد مادة تحقق الشرط: $N_2 > N_1$

اخيرا فلنحدد عدد الانظمة الاجمالي N_0 للنظام: $N_0 = N_1 + N_2$

تدعى الكمية $N_0\sigma$ بمعامل الامتصاص للمادة غير المثارة α_0. يمكن كتابة F(l) بدلة α_0 كما يلي:

$$F(l) = F_0 e^{-\alpha_0 (n_2 - n_1) l} \qquad (36.1)$$

حيث: $n_2 = N_2/N_0$ و $n_1 = N_1/N_0$، n_1 و n_2 تدعى بالإسكان الطبيعي للمستويين 1 و 2 على التوالي.

و تدعى الكمية :

$$G = e^{\alpha_0 (n_2 - n_1) l} \qquad (37.1)$$

بربح القضيب لعبور واحد.

تسمى الكمية $n = n_2 - n_1$ بالإسكان المقلوب الطبيعي تتراوح بين +1 و -1.

اذا تجاوز الكسب 1 اي $n_2 - n_1 > 0$ فأنه في هذه الحالة يمكن الحصول على صاف تضخيم للموجة[52].

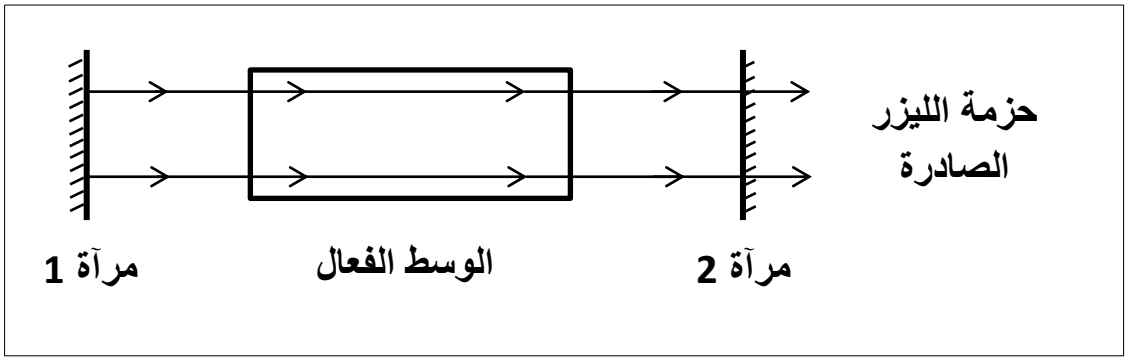
3.8 الانقلاب الاسكاني(Population Inversion):

حسب المعادلة (37.1) و في حالة عدم التوازن الحراري التي فيها $n_2 - n_1 > 0$ فإن المادة تعمل بمثابة مضخم و يقال ان هناك انقلابا اسكاني في المادة الذي يعني ان فرق الإسكان $n_2 - n_1$ يعاكس في الاشارة ما هو قائم في التوازن الحراري[$n_2 - n_1 < 0$] اي موجب. و المادة التي يتحقق فيها هذا الانقلاب تعتبر وسطا فعالا active-medium.

اذا وقع تردد الانتقال υ_0 ضمن المنطقة الميكروية (microwave) فيطلق على المضخم اسم مضخم ميزر maser Amplifier. اما اذا وقع التردد ضمن المنطقة البصرية optical region فيطلق عليه مضخم ليزر laser Amplifier. و عادة لا تقتصر كلمة ليزر على ترددات الضوء المرئي فقط و لكن لأي تردد في المنطقة البعيدة أو القريبة من تحت الحمراء، وفي المنطقة فوق البنفسجية و حتى في منطقة الأشعة السينية[56].

4.8 شرط العتبة (Threshold condition):

لكي نكون مذبذبا oscillator من المضخم فمن الضروري إدخال تغذية راجعة موجبة positive feedback و يتم الحصول عليه في حالة الليزر بوضع المادة الفعالة بين مرآتين لهما انعكاسية عالية (مثال ذلك مرآتان مستويتان متوازيتان **الصورة. 8.1**. في هذه الحالة الموجة الكهرومغناطيسية المستوية التي تسير عموديا على المرآتين سترتد ذهابا و إيابا و تتضخم في كل جولة خلال المادة. فإذا كانت احدى المرآتين شفافة جزئيا فمن الممكن الحصول على حزمة خارجة output beam. و لحصول ذلك يجب ان يتحقق شرط العتبة Threshold condition. ففي الليزر سيبدأ التذبذب عندما يعادل الربح في الفوتونات من المادة الفعالة الخسائر.



الصورة. 8.1. - مخطط توضيحي لمبدأ عمل الليزر[56]

استنادا للمعادلة(37.1) و اذا كانت مستويات الطاقة 1 و 2 متوالد أي $g_2\,\sigma_{21} = g_1\,\sigma_{12}$ فإن مقدار الربح لكل عبور في المادة الفعالة (اين النسبة بين تدفق الفوتونات الخارجة الى التدفق الداخل) هو:

$$exp\sigma[N_2 - (g_2N_1/g_1)]l \qquad (38.1)$$

حيث نعتبر ان $\sigma = \sigma_{21}$ من اجل البساطة، و ان l تمثل طول المادة الفعالة. لنفرض ان R_1 و R_2 هما الانعكاسية في الطاقة للمرآتين **الصورة. 8.1**، و لنفرض ان L_i كانت الخسائر داخل المجاوبة جراء عبور الحزمة لمرة واحدة. فإن تدفق الفوتونات F' بعد مرورين على المادة الفعالة يكون:

$$F' = Fexp\{\sigma[N_2 - (g_2N_1/g_1)]l\}(1 - L_i)R_2.$$

$$exp\{\sigma[N_2 - (g_2N_1/g_1)]l\}(1 - L_i)R_1 \qquad (39.1)$$

عند تحقق حد العتبة يكون لدينا:

$$R_1R_2(1 - L_i)exp\{\sigma[N_2 - (g_2N_1/g_1)]l\} = 1 \qquad (40.1)$$

و هذه المعادلة تبين ان شرط العتبة يتحقق عندما يصل انقلاب الإسكان الى قيمة حرجة

$$N = N_2 - (g_2N_1/g_1) \qquad (41.1)$$

ويدعى الانقلاب الحرج critical inversion و يعطى بالعلاقة التالية:

$$N_C = -\frac{LnR_1R_2 + 2Ln(1 - L_i)}{2\sigma l} \qquad (42.1)$$

حالما يتحقق شرط الانقلاب الحرج يبدأ التذبذب بالنمو من الإصدار التلقائي. إذ إن الفوتونات الصادرة تلقائيا التي تسير موازية لمحور المجاوبة ستبدأ عملية التضخيم هذا هو أساس المذبذب الليزري laser oscillator أو الليزر laser كما هو متعارف عليه[56].

5.8 عملية الضخ:

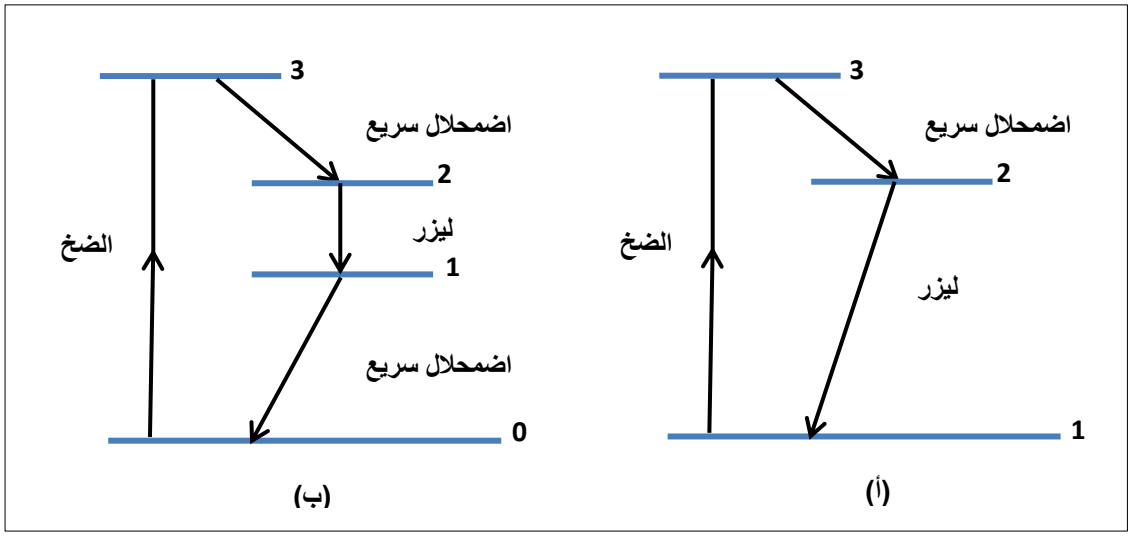
سوف ندرس كيفية الحصول على انقلاب الإسكان لمادة معينة، يبدو لأول وهلة أنه من المحتمل الحصول على انقلاب الإسكان من خلال تفاعل المادة مع حقل كهربائي قوي لموجة كهرومغناطيسية ذات شدة كبيرة. بما ان المادة في حالة توازن حراري فإن الموجة القادمة سوف تحدث انتقالات من السوية 1 إلى السوية 2 أكثر من الانتقالات من السوية 2 إلى السوية 1. و نأمل بهذه الطريقة أن نصل إلى حالة انقلاب الإسكان. لكن هذا الامر لا يصح و خاصة في حالة الاستقرار، لأنه عندما نصل الى حالة تساوي إسكان السويتين أي $g_2N_2 = g_1N_1$ فأن عملية

الامتصاص ستعادل عملية الإصدار المتحرض و وفقا للمعادلة (22) ستصبح المادة شفافة. و لذلك فمن المستحيل الحصول على الانقلاب الإسكاني باستخدام منظومة سويتين 1 و 2 فقط[56].

1.5.8 ليزر السويات الثلاث:

في ليزر السويات الثلاثة **الصورة. 9.1 (أ)** ترفع الذرة بطريقة ما من السوية الأرضية إلى السوية 3. فإذا انحلت الذرات بعد صعودها من السوية 3 بسرعة إلى السوية 2. فيمكن الحصول على الانقلاب الإسكاني بين السويتين 1 و 2.

لنفرض ان N_t تمثل الكثافة الكلية للذرات في المادة. تكون الذرات في البداية في السوية 1 ثم تبدأ عملية رفع الذرات من السوية 1 إلى السوية 3. و بعدئذ ستنحل الذرات إلى السوية 2. فإذا كان هذا الانحلال سريعا لحد كاف فإن السوية 3 ستبقى فارغة تقريبا. فرضا ان للسويتين 1 و2 غير انطباقيتين أي $g_1 = g_2 = 1$ او ان لهما نفس الانطباقية في هذه الحالة يجب رفع نصف عدد الذرات الكلي N_t إلى السوية 2 لتساوي عدد الذرات في السويتين 1 و 2 و بعدئذ فإن أية ذرة ترفع سوف تسهم في الانقلاب الإسكاني[56].



الصورة. 9.1 - مخطط مستويات الطاقة لمادة ليزرية (أ) مادة ذات ثلاثة مستويات (ب) مادة ذات اربع مستويات[56].

2.5.8 ليزر السويات الأربعة:

ترفع الذرات من السوية الأرضية 0 إلى السوية 3 في ليزر السويات الأربعة **الصورة. 9.1 (ب)**. فإذا انحلت الذرة بسرعة إلى السوية 2 فمن الممكن الحصول على الانقلاب الإسكاني بين السويتين 2 و1. ما أن تبدأ الذبذبة في

مثل هذا الليزر فسوف تنتقل الذرات إلى السوية 1 (نتيجة الإصدار المتحرض). و في حالة الليزر المستمر فإنه لمن الضروري أن يكون الانتقال 1 الى 0 سريعا جدا (هذا ممكن عادة بانحلال غير إشعاعي). للتعويض و استمرار الصعود من 0 إلى 3.

ففي هذا النوع من الليزر و بما ان السوية 1 فارغة من البداية عكس ليزر السويات الثلاثة. فإن رفع اي ذرة إلى السوية 2 تسهم في الحال بعملية الانقلاب الإسكاني[56].

تسمى العمليات التي يتم فيها رفع الذرات من السوية 1 الى السوية 3 (في حالة ليزر ذي ثلاثة سويات) او من السوية 0 الى السوية 3 (في حالة ليزر اربع سويات) بعملية الضخ. و تتم هذه العمليات بإحدى الطرقتين التاليتين: إما ضوئيا أو كهربائيا، ففي الضخ الضوئي الضوء الصادر من مصدر قوي يتم امتصاصه من قبل المادة الفعالة وبذلك تنتقل الذرات الى السوية الاعلى. ان هذه الطريقة مناسبة بصورة خاصة في ليزرات الحالة الصلبة أو الليزرات السائلة (مثل ليزرات الصبغة). أما الضخ الكهربائي فيتم عن طريق تفريغ كهربائي شديد لحد الكفاية، و هو مناسب بصورة خاصة الليزرات الغازية و شبه الموصلة. ولا يمكن استخدام الضخ الضوئي في الليزرات الغازية بسبب صغر عرض خطوط امتصاصها. و من ناحية ثانية يمكن استخدام الضخ الضوئي و بصورة فعالة في ليزرات شبه الموصلات، ان عمليتي الضخ المنوه عنهما اعلاه ليستا العمليتين المتوفرتين الوحيدتين لضخ الليزرات فهناك مثلا، ضخ عن طريق التفاعلات الكيميائية (الضخ الكيميائي)، و الضخ عن طريق تمديد الغاز بسرعة فوق الصوتية (ضخ الديناميك الغازي) و يجب الاشارة الى ان هناك توجها متزايدا لاستخدام الليزرات في الضخ الضوئي لليزرات أخرى مثل الليزرات الصلبة أو ليزرات الصبغة أو الليزرات الغازية[56].

يعبر عن معدل إشغال سوية الليزر العليا عن طريق الضخ $(dN_2/dt)_p$ بالاتي:

$$(dN_2/dt) = W_P N_g \qquad (43.1)$$

حيث N_g إسكان السوية الأرضية W_p معامل ملائم و يطلق عليه معامل الضخ[56].

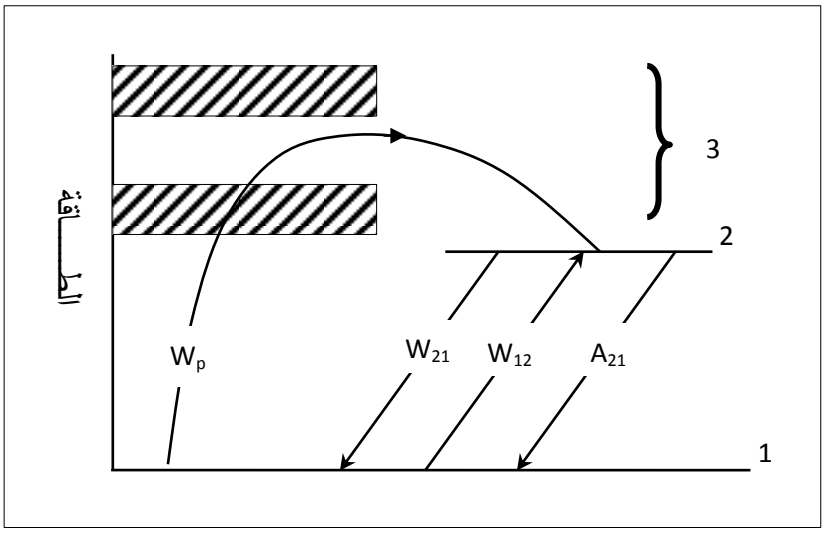
6.8 معادلات المعدلات الزمنية: (Rate Equations):

1.6.8 معادلات المعدلات الزمنية ليزر الثلاثة مستويات:

سنصف هنا كمثال ليزر ثلاثي المستويات يتم ضخه بصريًا **الصورة. 10.1** مستويات الطاقة 1 و 2 هي المستويات المشاركة في انتقال الليزر الفعلي. المستوى الثالث مطلوب لتحقيق انعكاس إسكاني.

في الليزر الذي يتم ضخه بصريًا ، يتم تشعيع المادة النشطة بضوء قوي، عادةً ما يكون مصباحًا ضوئيًا، يُعرف باسم المضخة. يمتص الليزر ضوء المضخة بقوة في نطاق (المستوى 3) حول hv_p. ومع ذلك لا يتم ملء هذا

النطاق أبدًا نظرًا لوجود انتقال فوري غير مشع تقريبًا من المستوى 3 إلى المستوى 2.



الصورة. 10.1 - مخطط ليزر ثلاثة مستويات[52].

إذا كان من الممكن ضخ الذرات أو الأيونات أو الجزيئات الفعلية إلى المستوى 2 أسرع من تحللها (عن طريق الانبعاث التلقائي) إلى المستوى 1، يمكن تحديد الانقلاب الإسكاني المطلوب[52].

يمكننا كتابة معادلة المعدل الزمني لتطور اسكان المستوى N_2 كما يلي:

$$\frac{dN_2}{dt} = -(W_{21} + A_{21})N_2 - (W_p + W_{12})N_1 \qquad (44.1)$$

حيث W_p هو معدل الضخ لكل ذرة ، و W_{21} و A_{21} هي معدلات الانبعاث المحث والتلقائي من المستوى 2 إلى 1، و W_{12} معدل الامتصاص من المستوى 1. نظرًا لأن N_3 تساوي 0، توجد جميع الذرات في أي من المستوى 1 أو 2، و dN_1/dt هو فقط dN_2/dt بالإشارة السالب. لأن المقاطع العرضية للانبعاثات المحث والامتصاص متساوية $W_{12} = W_{21}$.

تم حل معادلة المعدل الزمني للحالات المستقرة بوضع :

$$\frac{dN_2}{dt} = 0$$

من ذلك نجد:

$$(W_p + W_{12})n_1 = (W_{12} + A_{21})n_2 \qquad (45.1)$$

و من عبارات الاسكان الطبيعية n_1 و n_2 ، و باستخدام عبارة الاسكان الطبيعي المقلوب n نجد:

$$n = \frac{W_p - A_{21}}{W_p + A_{21} + 2W_{12}} \qquad (46.1)$$

و من اجل التضخيم $n > O$ او $W_p > A_{21}$

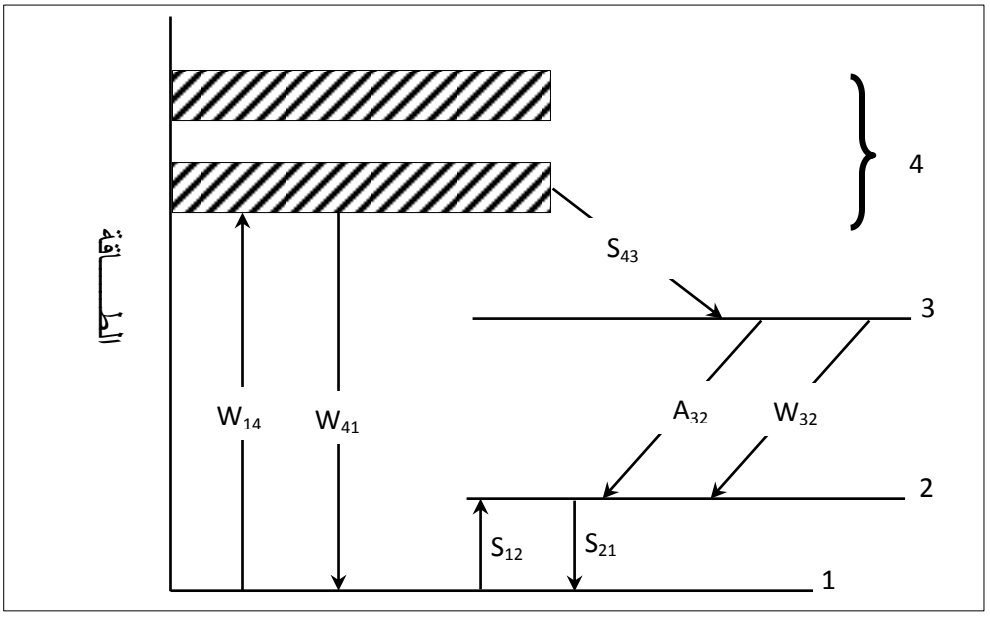
يجب أن نضخ إلى المستوى 2 أسرع من نضوب N_2 عن طريق الانبعاث التلقائي. يعتمد Wp على كل من كثافة الطاقة لضوء المضخة وعلى المقطع العرضي لامتصاص المادة. وبالتالي تحقق: (أ) مصدر ضخ مكثف، (ب) امتصاص قوي لضوء المضخة، (ج) مستوى علوي طويل العمر (صغير A_{21}) مرغوب فيه، إن لم يكن ضروريًا.

يمكننا تقدير قوة الضخ المطلوبة لتحقيق الربح عن طريق كتابة Wp بدلالة تدفق الفوتون F_p والمقطع العرضي لامتصاص ضوء الضخ[52]:

$$W_p = F_p \sigma_p \qquad (47.1)$$

2.6.8 معادلات المعدلات الزمنية لليزر الاربعة مستويات:

ان تحليل الوضع الحركي في الليزرات الصلبة ذات الاربعة مستويات و المثارة بالطريقة البصرية، يحتاج الى ايجاد مجموعة من المعادلات تضم كل اسكانات المستويات الاربعة و تضم جميع انواع الانتقالات التي يمكن ان تحدث فيما بين هذه المستويات. و تبين **الصور. 11.1** غالبية الانتقالات الضرورية التي تحدث في ليزر صلب بأربعة مستويات.



الصورة. 11.1 - مخطط ليزر الاربع مستويات[56].

حيث يرمز لمعدل الضخ بالرمز W_{14}، و يرمز للمعدلات الزمنية للانتقالات اللإشعاعية بالرمز S. ويرمز للمعدلات الزمنية للانتقالات الآنية و المستحثة عند التردد الليزري بالرموز A_{32} و W_{32} على التوالي. يتم اختيار المادة و المستويات المعنية بحيث تكون المعدلات الزمنية S اعلى بكثير فيما لو قورنت بالمعدلات الزمنية الاخرى. وتكون الانتقالات من المستوى 3 الى مستوى الهمود ممنوعة. و بنفس طريقة ليزر الثلاثة مستويات يمكن كتابة معادلات المعدلات الزمنية للأعداد المحتلة N_1 و N_2 و N_3 و N_4 [56].

و لكي تشتغل ليزر ذات الاربعة مستويات بنجاح، يجب ان تكون معظم الذرات الفعالة في المستويين 3 و 1. و نحصل على هذه الحالة عندما تكون المعدلات الزمنية الانتقالية S_{43} و S_{21} عالية جدا بحيث يتم تفريغ المستويات 4 و 2 بسرعة عالية. ويكون المستوى 2 في اغلب الاحيان عبارة عن مستوى ثانوي لمستوى الهمود للأيون. حيث ينفصل عن مستوى الهمود بتأثير المجال البلوري. وعندما تكون هذه هي الحالة، يصبح من الضروري تشغيل الليزر عند درجة حرارة واطئة بحيث يتحقق الشرط $KT << E_2 - E_1$ والا سيزداد اسكان المستوى الليزري

الحدي بذرات تتهيج بالطاقة الحرارية المتوفرة.

و في اقصى الحالات البسيطة، و عندما يمكن اهمال كل من N_2 و N_4 فيما لو قورنت بالإسكانات N_1 و N_3، يجوز لنا اعتبار الليزر و بصورة تقريبية كمنظومة بمستويين فقط من الطاقة. و بذلك يمكننا ان نكتب المعادلة (قبل بدء الفعالية الليزرية) بالشكل:

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{14}N_1 - A_{32}N_3 \qquad (48.1)$$

و من ثم نحصل في حالة التوازن الحراري على :

$$\frac{N_3}{N_1} = \frac{W_{14}}{A_{32}} \qquad (49.1)$$

تبين المعادلة (49.1) على انه تحت ظروف معينة، يمكننا الوصول الى حد العتبة بإثارة متوسطة.

و تستخدم الليزر النموذجية المعروفة ذات الاربعة مستويات ايونات النيوديميوم Nd^{+3} المزروعة في بلورات مثل $CaWO_4$، فقد لوحظ حقيقة بأن مثل هكذا ليزر يمكن اثارتها الى حد العتبة بتشعيعها بكميات اقل بكثير مما نحتاجه لإثارة ليزر ياقوتية مشابها لها[56].

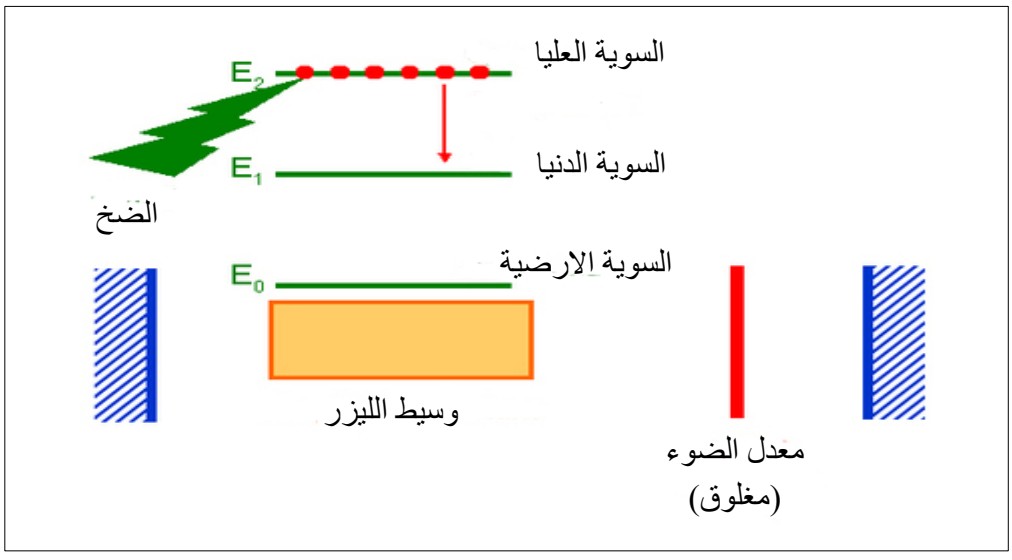
9. ظروف التشغيل الزمنية المختلفة:

أن إشعاع الليزر هو شعاع ضوئي مكاني وطيفي مركّز. من الممكن أيضًا تصنيف الحزمة على أنها "تركيز زمني" من خلال اعتبار أن الفوتونات المنبعثة تتكثف في نبضات طاقة قصيرة. تزداد احتمالية الحصول على

انبعاث محث مع زيادة عدد ذرات الحالة المثارة والفوتونات الساقطة. لذلك هناك طريقتان لتفضيل الانبعاث المحث: إما عن طريق زيادة عدد ذرات الحالة المثارة أو عن طريق زيادة عدد الفوتونات الساقطة. الطريقة الأولى لتحقيق التركيز الزمني هي إطلاق الانبعاثات المحثة فقط عندما يكون هناك عدد كبير من الذرات في المستوى العلوي او ما يسمى تبديل عامل النوعية (Q-switching). في الطريقة الثانية يتم تكثيف الفوتونات الموجودة في التجويف البصري في "حزمة" أو "نبضة" ترتد ذهابًا وإيابًا بين المرايا او ما يسمى تثبيت النمط (Mode-Locked).

1.9 تبديل عامل النوعية (Q-switched Laser):

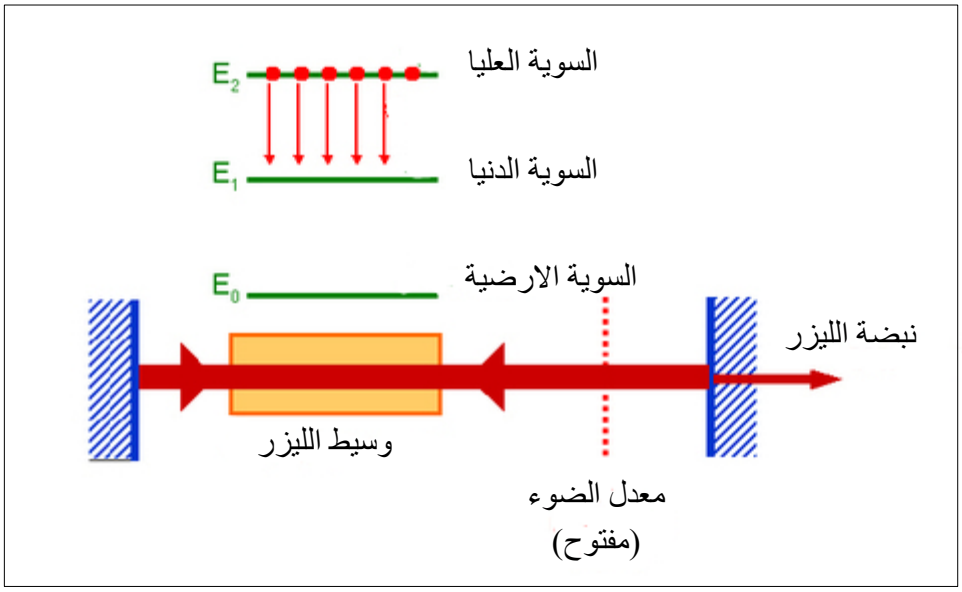
من أجل تخزين العديد من الذرات في مستوى أعلى، يجب أولاً تقييد التدفق إلى مستوى أدنى. وبالتالي يجب منع الانبعاث المحث عن طريق وضع مخفف في التجويف لمنع الضوء من الانتقال ذهابًا وإيابًا (ملاحظة: هذا المخفف عادة ما يكون معدلا للضوء وليس مصراعًا ميكانيكيًا، مما يقلل من سعة أو قوة الحزمة الضوئية). في هذه الحالة بالنسبة للانتقال الإشعاعي فإن الانحلال الوحيد إلى مستوى أدنى يرجع إلى الانبعاث التلقائي. عندما يزود نظام الضخ ذرات أكثر في الثانية من فقدان الطاقة عن طريق الانبعاث التلقائي، يمكن أن يصبح الاسكان في المستوى الأعلى كبيرًا جدًا **الصور. 12.1**. من السهل تحقيق حالة التشغيل هذه باستخدام الوسائط ذات معدل الانبعاث التلقائي المنخفض. هذا صحيح بالنسبة لليزر المشبع بالأيونات في الحالة الصلبة (على سبيل المثال Nd: YAG أو Yb: YAG) ولكن ليس للغاز (النيون أو الأرجون) أو ليزر أشباه الموصلات. هذه لديها معدلات عالية من الانبعاث التلقائي لذلك من الصعب الوصول إلى عدد كبير من الاسكان في المستوى الأعلى.



الصورة. 12.1 - تراكم الذرات في المستوى العلوي عند انسداد التجويف البصري[57].

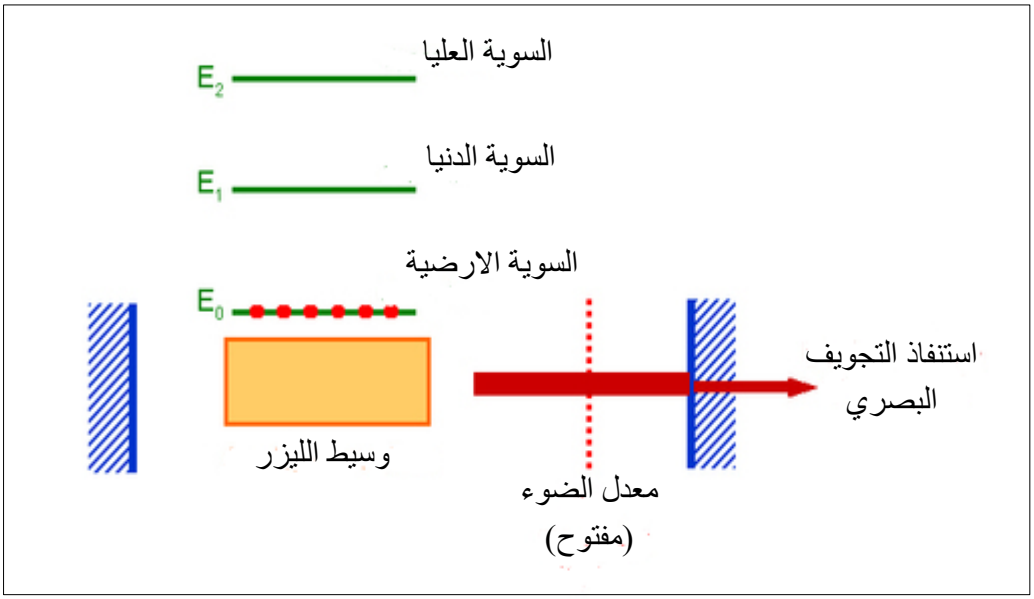
بعد فترة زمنية معينة، يتم تقليل فقد الطاقة في التجويف فجأة بحيث يصبح تذبذب الليزر ممكنًا. نظرًا لوجود عدد كبير جدًا من الاسكان في المستوى العلوي، يصبح الانبعاث المحث محتملاً للغاية ويتم تشغيل الليزر فجأة. يكون

التدفق الناتج عن الانبعاث المحث أكبر بكثير من التدفقات الأخرى (الملء بالضخ والإفراغ بالانبعاث التلقائي). تنخفض جميع الذرات المخزنة في المستوى العلوي بشكل حاد، وتصدر فوتونات محثه (بدءًا من الانبعاث التلقائي المحاصر في التجويف). وهكذا يمتلئ تجويف الليزر بالفوتونات المحثة في نفس الوقت الذي يفرغ فيه المستوى العلوي **الصور. 13.1**.



الصورة. 13.1 - حدوث مفعول الليزر بمجرد فتح التجويف البصري فجأة [57].

في النهاية المستوى العلوي فارغ تمامًا. لا يوجد انبعاث محث إضافي وسوف يفرغ التجويف أيضًا بسبب الخسائر الناتجة عن مرآة الإخراج (بشكل عام، يفرغ التجويف بعد بضع رحلات ذهابًا وإيابًا فقط) الصورة. 14.1[57].



الصورة. 14.1 - نضوب التجويف البصري بمجرد عودة جميع الذرات إلى الحالة الأرضية [57].

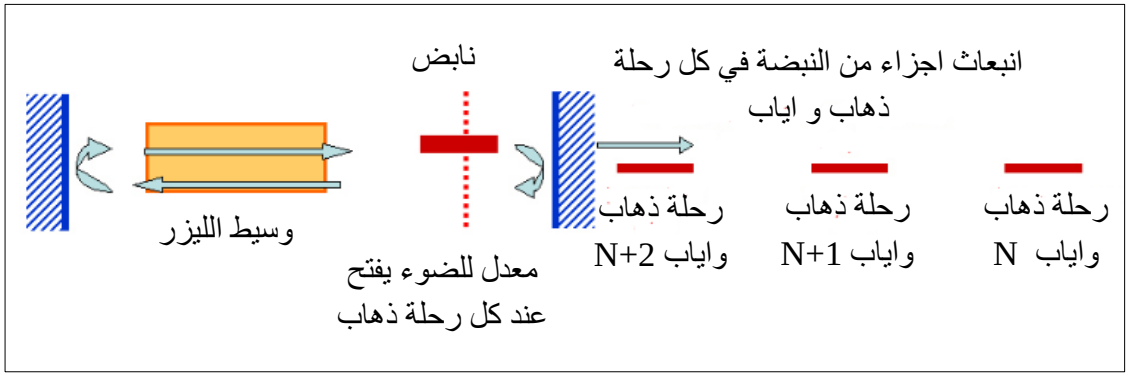
تؤدي هذه العملية إلى تباين كبير في عدد الفوتونات في التجويف (أولاً عن طريق تضخيم كبير بسبب الانبعاث المحث ثم بالإفراغ الكامل للتجويف في النهاية). النتيجة النهائية هي انبعاث نبضة قصيرة من الضوء عبر مرآة الاصدار[57].

2.9 طريقة تثبيت النمط (Mode-Locked):

تقنية التشغيل الثانية مختلفة تمامًا هذه المرة، يُترك مذبذب الليزر للوصول إلى حالة ثابتة ولا يتم حظر التذبذب في التجويف. ومع ذلك يُمنع التجويف من الامتلاء بالفوتونات في كل مكان في نفس الوقت: يُسمح فقط لحزمة من الفوتونات بالانتشار في التجويف. يستمر هذا النبض لفترة أقصر من رحلة ذهابًا وإيابًا في التجويف. وبعبارة أخرى فإن امتداده المكاني أقصر بشكل ملحوظ من طول التجويف.

تتمثل الطريقة المستخدمة للحصول على ظروف التشغيل هذه في استخدام مُعدِّل للضوء سريع يمكنه قطع الضوء في التجويف إلى فترات بنفس الطول تمامًا مثل رحلة الذهاب والإياب. وبالتالي فقط تلك الفوتونات المسموح لها بالمرور عبر المغير في حالتها سيتم تضخيمها وستجد دائمًا المغير في هذه الحالة بعد كل رحلة ذهابًا وإيابًا. ستتعرض الفوتونات الأخرى في مكان آخر في التجويف للخسارة عندما تنتقل عبر المعدل **الصورة.15.1**.

بشكل عام، تدوم النبضات لفترة أقصر بكثير من رحلة الذهاب والإياب في التجويف. وهي مقيدة بتحويل فوريه للطيف المنبعث من الليزر كلما اتسع الطيف كان النبض أقصر. هذا يعني أنه إذا كان وسط التضخيم عريضًا بشكل استثنائي (على سبيل المثال فإن الياقوت المطلي بالتيتانيوم له عرض طيفي أكبر من 300 نانومتر)، فإن النبضة المتولدة ستكون فقط عدة فمتوثانية طولا[57].



الصورة. 15.1 - نبضة تنتشر في التجويف البصري لليزر مثبت النمط. [57].

توضح **الصورة. 15.1** نبضة واحدة تنتقل في التجويف. ومع ذلك يمكن رؤية قطار نبضي يغادر الليزر، ويتولد في كل مرة تضرب فيها النبضة مرآة الخرج. تتوافق فترة تكرار النبضة مع زمن دورة ذهابًا وإيابًا في التجويف (عادةً عدة نانو ثانية).

متوسط طاقة الليزر مثبت النمط هو من نفس رتبة مقدار الليزر ذي الموجة المستمرة. في الواقع على عكس

ليزر Q-switched، يمكن أن تصل هذه أيضًا إلى حالة ثابتة مثل ليزر الموجة المستمرة. الفرق الأساسي هو أن الفوتونات المحثه تتكثف في حزمة بدلاً من أن تنتشر في جميع أنحاء التجويف. خلال رحلة واحدة ذهابًا وإيابًا، تنبعث نبضة ليزر واحدة فقط عبر مرآة الإخراج. وبالتالي فإن طاقة النبض تساوي متوسط القدرة مضروبًا في مدة الرحلة ذهابًا وإيابًا. بشكل عام هذه الطاقات من ترتيب عدة نانو جول[57].

يأتي مصطلح "تثبيت النمط" من تحليل الترددات المختلفة. ينبعث الليزر الذي يعمل في ظل هذه الظروف عبر عدة ترددات مختلفة بسبب التعديل السريع للمعدِّل. يتم فرضها أيضًا بواسطة التجويف البصري متباعدة بواسطة الأنماط الطولية للتجويف[57].

3.9 أوضاع التشغيل الأخرى (الضخ النبضي):

هناك أوضاع تشغيل أخرى تعتمد على التغييرات التي تم إجراؤها على نظام الضخ بدلاً من التجويف. وبطبيعة الحال عندما يكون الضخ نابضًا، فإن انبعاث الليزر يكون ايضا نابضا. عندما يكون هناك وسط مضخم فقط في التجويف (لا يوجد معدل)، يتم تعريف وضع التشغيل على أنه تحويل الكسب. بشكل عام تكون النبضات التي تحدث أثناء تحويل الكسب أطول وأضعف من ليزر Q-switched.

في حالة ليزر الصمام الثنائي، يمكن تعديل الضخ بسهولة بواسطة نبضات التيار الكهربائي. يرتبط الكسب في أشباه الموصلات ارتباطًا مباشرًا بالتعديلات المختلفة وتعرف العملية باسم تحويل الكسب. يمكن أن تكون النبضات قصيرة جدًا (عدة بيكو ثانية فقط) ولكن الطاقة المنبعثة منخفضة جدًا (من رتبة 10^{-12} جول فقط).

10. تصاميم المرنانة:

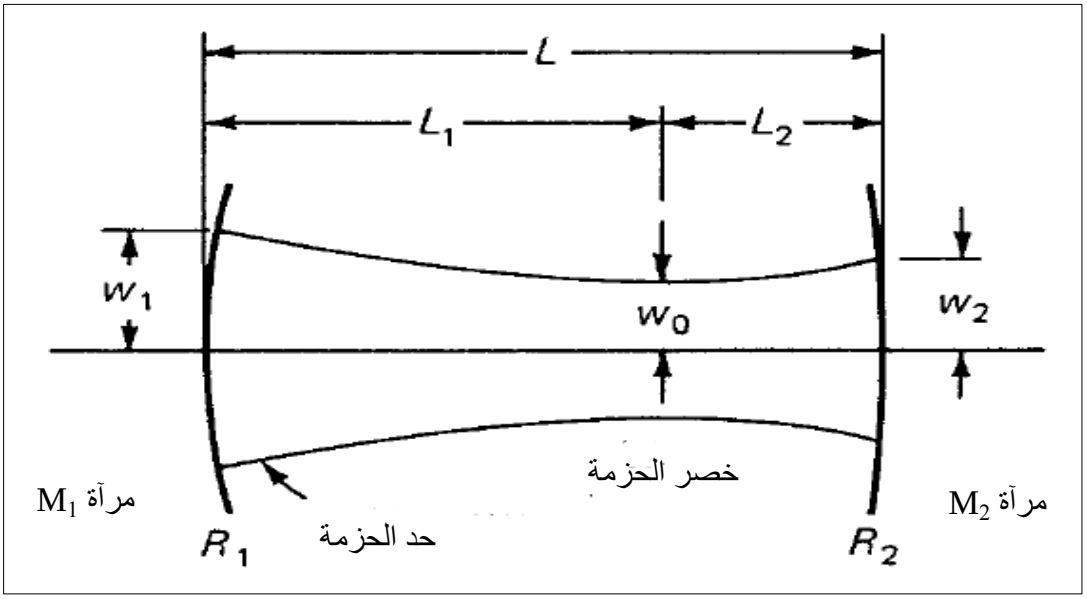
تتكون رنانات الليزر الأكثر شيوعًا من مرآتين كرويتين أو مسطحتين تواجهان بعضهما البعض ، سننظر أولاً في توليد النمط الأقل ترتيبًا TEM_{00} بواسطة مثل هذا التصميم الرنان. بمجرد معرفة متغيرات النمط TEM_{00} يتم تدرج جميع الانماط الأعلى ترتيبا منه بطريقة معروفة.

الشعاع الغاوسي المشار إليه في **الصورة 16.1.** له انحناء في مقدمة الموجة R_1 على مسافة t_1 من وسط الحزمة. إذا وضعنا مرآة عند L_1، نصف قطر انحنائها يساوي نصف قطر انحناء الموجة فإن شكل النمط لن يتغير.

للمضي قدمًا، يمكننا المضي قدمًا على طول المحور z إلى نقطة أخرى L_2 حيث يحتوي TEM_{00} على نصف قطر انحناء R_2، ونضع هناك مرآة نصف قطر انحنائها R_2 يساوي نصف قطر الموجة الكروية عند L_2. مرة أخرى يظل شكل النمط دون تغيير.

لذلك لصنع مرنانة نقوم ببساطة بإدخال عاكسين يتطابقان مع اثنين من الأسطح الكروية المحددة بواسطة (5.7).

بدلاً من ذلك بالنظر إلى مرآتين مفصولتين بمسافة L، إذا كان موضع المستوى z = 0 وقيمة المعلمة w_0 يمكن تعديلها بحيث تتزامن انحناءات المرآة مع أسطح واجهة الموجة، فسنكون قد وجدنا نمط الرنانة[4].



الصورة 16.1. متغيرات النمط المهمة مرنانة بها مرايا ذات انحناء غير متساوٍ [4].

سنقوم الآن بإدراج الصيغ المشتقة بواسطة Kogelnik و Li ، والتي تربط متغيرات الوضع w_1 و w_2 و w_0 و L_1 و L_2 بمتغيرات المرنانة R_1 و R_2 و L. كما هو موضح في **الصورة 16.1.** و w_1 و w_2 هي نصف قطر البقعة على المرايا M_1 و M_2 على التوالي L_1 و L_2 هما مسافات وسط الحزمة الموصوفة بواسطة w_0 من المرايا M_1 و M_2 على التوالي و R_1 و R_2 هما انحناءات المرايا M_1 و M_2 المفصولة بمسافة L. تشير الاصطلاح إلى أن الانحناءات المقعرة موجبة.

يعطى نصف قطر الحزمة عند المرايا بالعبارة:

$$W_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi}\right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L}\left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right) \qquad (50.1)$$

$$W_2^4 = \left(\frac{\lambda R_2}{\pi}\right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L}\left(\frac{L}{R_1 + R_2 - L}\right) \qquad (51.1)$$

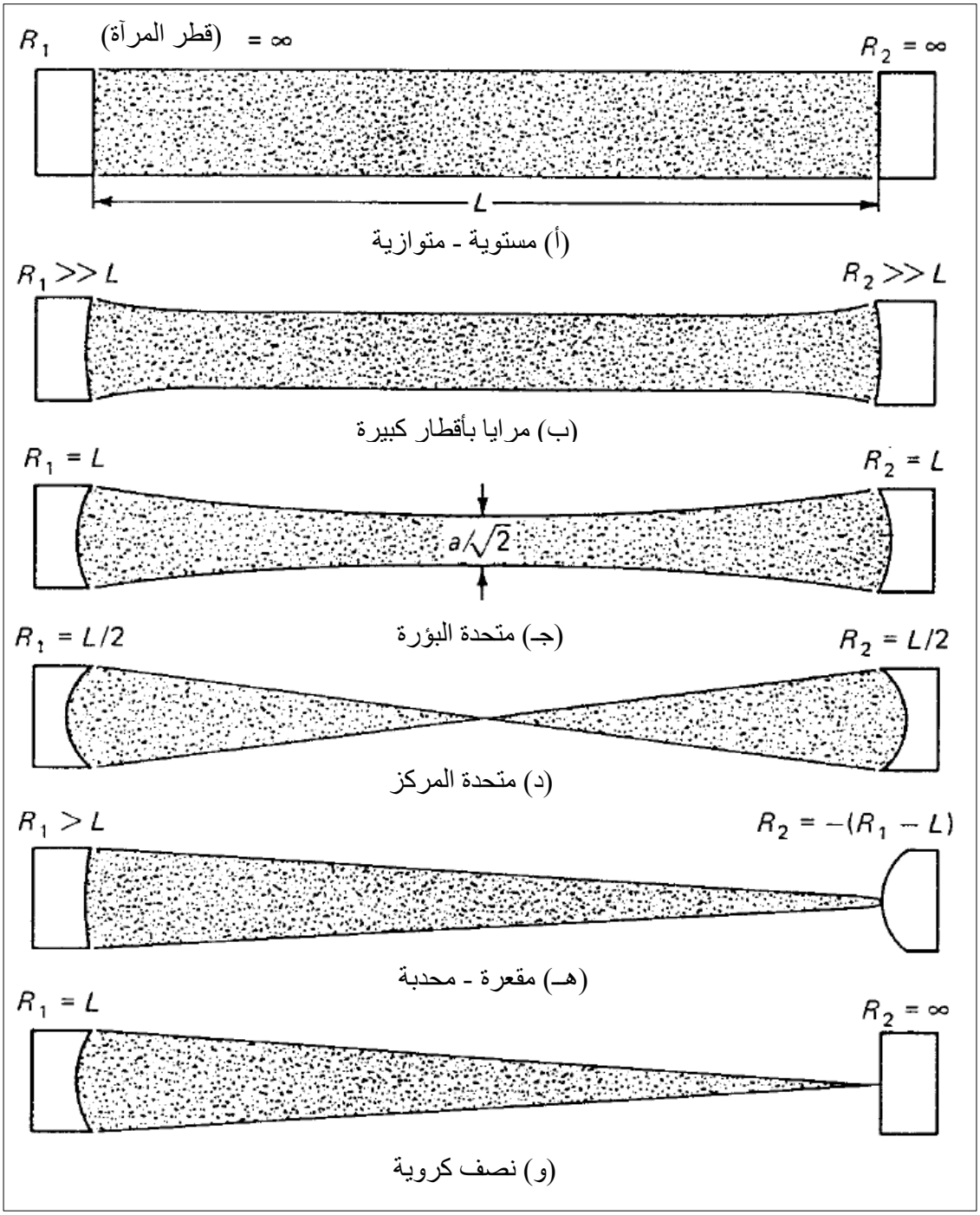
يتم إعطاء نصف قطر خصر الحزمة، والذي يتكون إما داخل أو خارج المرنانة بالعلاقة:

$$W_2^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2} \qquad (52.1)$$

المسافات L_1 و L_2 بين الخصر والمرايا مقاسة موجبة **الصورة 16.1.** هي:

$$L_1 = \frac{L(R_2-L)}{R_1+R_2-2L} \quad ، \quad L_2 = \frac{L(R_1-L)}{R_1+R_2-2L} \tag{53.1}$$

تعالج هذه المعادلات الحالة الأكثر عمومية للمرنانة. هناك العديد من تصاميم المرنانة البصرية التي تم تبسيطها إلى حد كبير (50.1) - (53.1). توضح **الصورة 17.1.** بعض الأشكال الهندسية الأكثر استخدامًا.



الصورة. 17.1 - انواع الرنانات الشائعة (نمط الشعاع داخل التجويف مظلل)[4].

1.10 مرايا ذات انحناء متساوٍ:

مع R1 = R2 = R نحصل من (50.1) و (51.1):

$$w_{1.2}^2 = \frac{\lambda R}{\pi}\left(\frac{L}{2R-L}\right)^{1/2} \qquad (54.1)$$

خصر الحزمة الذي يحدث في مركز الرنان $L_1 = L_2 = R / 2$ هو:

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{2\pi}[L(2R-L)]^{1/2} \qquad (55.1)$$

إذا افترضنا كذلك أن أنصاف أقطار المرآة كبيرة مقارنة بطول الرنان $R >> L$ ، فإن الصيغة أعلاه تبسط إلى:

$$w_{1.2}^2 = w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)\left(\frac{RL}{2}\right)^{1/2} \qquad (56.1)$$

على النحو التالي من (53.1) في مرنان مؤلف من مرايا ذات نصف قطر كبير، يتغير قطر الحزمة قليلاً جدًا كدالة للمسافة.

يعد الرنانة المكوّن من مرايا ذات نصف قطر انحناء في حدود 2 إلى 10 أمتار، أي أطول بعدة مرات من طول الرنانة ، أحـــد أكثر التصاميم شيوعًا.

يتمتع مرنان المرآة ذو نصف القطر الكبير باستقرار تناسقي معقول واستخدام جيد للوسط النشط.

حالة خاصة للتكوين المتماثل هي الرنان المتحد المركز الذي يتكون من مرآتين مفصولتين بضعف نصف قطرهما، أي $R = L / 2$. تتكون الحزمة المتناظرة من نمط تكون أبعاده كبيرة إلى حد ما في كل مرآة والتي تركز على نقطة محدودة الانعراج في مركز الرنان. الرنان متحدة المركز حساس إلى حد ما لاختلال الخطي، ويمكن أن تؤدي البقعة الصغيرة إلى تلف بصري.

حالة خاصة أخرى مهمة جدًا للرنان مع المرايا ذات الانحناء المتساوي هو الرنان متحد البؤر. بالنسبة لهذا الرنان، فإن الفاصل بين المرايا يساوي انحناء المرايا المتطابقة، أي $R = L$. من (50.1) و (51.1) و (52.1) نحصل على العلاقة المبسطة:

$$w_{1,2} = \left(\frac{\lambda R}{\pi}\right)^{1/2} \quad \text{و} \quad w_0 = \frac{w_{1,2}}{(2)^{1/2}} \qquad (57.1)$$

يعطي التصميم البؤري أصغر بُعد ممكن للنمط لمرنان بطول معين. لهذا السبب غالبًا ما لا يتم استخدام الرنانات متحدة البؤرة لأنها لا تستخدم المادة الفعالة بكفاءة.

2.10 مرنانة مستوية- مقعرة:

نحصل على مرنان بمرآة مسطحة واحدة ($R_1 = \infty$) ومرآة منحنية واحدة.

$$w_1^2 = w_0^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)[L(R_2 - L)]^{1/2} \qquad (58.1)$$

و

$$w_2^2 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) R_2 \left(\frac{L}{R_2 - L}\right)^{1/2} \qquad (59.1)$$

يحدث خصر الحزمة w_0 عند المرآة المسطحة (أي $L_1 = 0$ و $L_2 = L$). حالة خاصة لهذا التكوين الرنان هو مرنان نصف كروي. يتكون الرنان نصف الكروي من مرآة كروية واحدة ومرآة مسطحة موضوعة تقريبًا في مركز انحناء الكرة. النمط الناتج له قطر كبير نسبيًا عند المرآة الكروية ويركز على نقطة حيود محدودة في المرآة المستوى. في الممارسة العملية يجعل الفصل بين المرايا L أقل قليلاً من R_2 بحيث يتم الحصول على قيمة w_1 التي تعطي خسائر انعراج صغيرة بشكل معقول[4].

في ليزر الحالة الصلبة يمكن أن يؤدي حجم البقعة الصغير إلى تلف بصري في المرآة. يتمتع مرنان نصف كروي القريب بأفضل استقرار خطي من أي تصميم لذلك غالبًا ما يتم استخدامه في الليزر منخفض الطاقة مثل ليزر He-Ne.

3.10 مرنانة مقعرة – محدبة:

تعتبر المرآة المحدبة ذات نصف القطر الصغير جنبًا إلى جنب مع مرآة مقعرة ذات نصف قطر كبير أو مرآة مستوية مرنانًا شائعًا جدًا في ليزر الحالة الصلبة عالي و متوسطة الطاقة. على النحو التالي من المناقشة في القسم التالي، المرنانة السلبية مثل هذا التكوين غير مستقر. ومع ذلك في مرنان يحتوي على بلورة ليزر ، يمكن أن يكون هذا التكوين مستقرًا نظرًا لأن خصائص الانفراج للمرآة المقعرة يتم إبطالها من خلال فعل التركيز لقضيب الليزر. نظرًا لأن المرآة المقعرة تعوض جزئيًا عن العدسة الحرارية يمكن تحقيق نمط بحجم كبير[4].

4.10 المرنانة المستوية – المتوازية:

المرنان المستوي - الموازي أو المسطح – المسطح والذي يمكن اعتباره حالة خاصة لتصميم المرآة ذات نصف القطر الكبير ($R_1 = R_2 = \infty$) حساس للغاية للاضطراب.

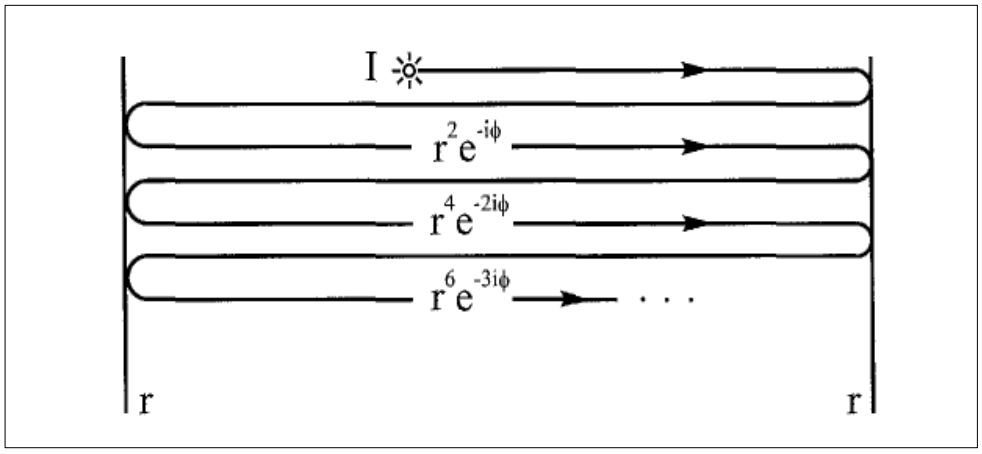
ومع ذلك في مرنان نشط أي مرنان يحتوي على بلورة ليزر، يمكن أن يكون هذا التكوين مفيدًا جدًا. يؤدي الاستخراج الحراري إلى العدسة الحرارية في الوسط النشط، وهذه العدسة الداخلية لها تأثير تحويل المرنان الموازي- المستوي إلى تصميم المرآة منحنية. لذلك فإن العدسة المستحثة حرارياً في مادة الليزر تقود المرنان المسطح إلى الاستقرار الهندسي[4].

5.10 الأنماط المحورية (Axial Modes):

للبدء فكر في موجة مستوية تنشأ داخل مرنان Fabry-Perot **الصورة 18.1.** بسعة A_0. بعد عدد كبير من الانعكاسات، يكون المجال الكلي داخل التجويف هو:

$$E = A_0\left(1 + r^2 e^{-i\emptyset} + r^4 e^{-2i\emptyset} + \cdots\right) \qquad (60.1)$$

للموجة التي تنتقل إلى اليمين r هو السعة المنعكسة على المرآتين، و $\emptyset = 2kd$ هو تغير الطور المرتبط برحلة واحدة ذهابًا وإيابًا. يفترض أن تنتقل الموجة بشكل متعامد بالنسبة إلى المرايا.



الصورة 18.1. مرنانة Fabry-Perot [52].

نحسب مجموع المتسلسلة الهندسية ونجد أن الشدة I داخل التجويف تكون:

$$I = I_0 \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\emptyset}{2}} \qquad (61.1)$$

حيث $F = 4R/(1-R)^2$ و R هي انعكاسية احدى المرايا. هذه هي بالضبط عبارة نفاذية مقياس التداخل Fabry-Perot. I تساوي I_0 عندما $m\lambda = 2d$.

الشرط المألوف للتدخل البناء. بالنسبة لجميع القيم الأخرى لـ λ، تكون الكثافة داخل التجويف صغيرة، لذلك إما أن يتم امتصاص الموجة أو تحويلها بواسطة المرآة ولا يمكن أن يحدث التذبذب. من المناسب التفكير في مرآة الاصدار على أنها ذات انعكاس فعال يساوي R فقط عندما تكون $m\lambda = 2d$ على وجه التحديد ، نكتب:

$$R_{eff} = \frac{R}{1 + F \sin^2 \frac{\emptyset}{2}} \qquad (62.1)$$

في معظم أجهزة الليزر يكون انعكاس المرآة الثانية بنسبة 100٪.

نظرًا لأن R_{eff} له نفس الشكل الوظيفي تمامًا مثل نفاذية مقياس التداخل Fabry-Perot، يمكننا اعتماد جميع نتائج هذا النقاش. على وجه التحديد وجدنا أن مقياس التداخل يرسل بشكل كامل في سلسلة من الأطوال الموجية مفصولة بالنطاق الطيفي الحر:

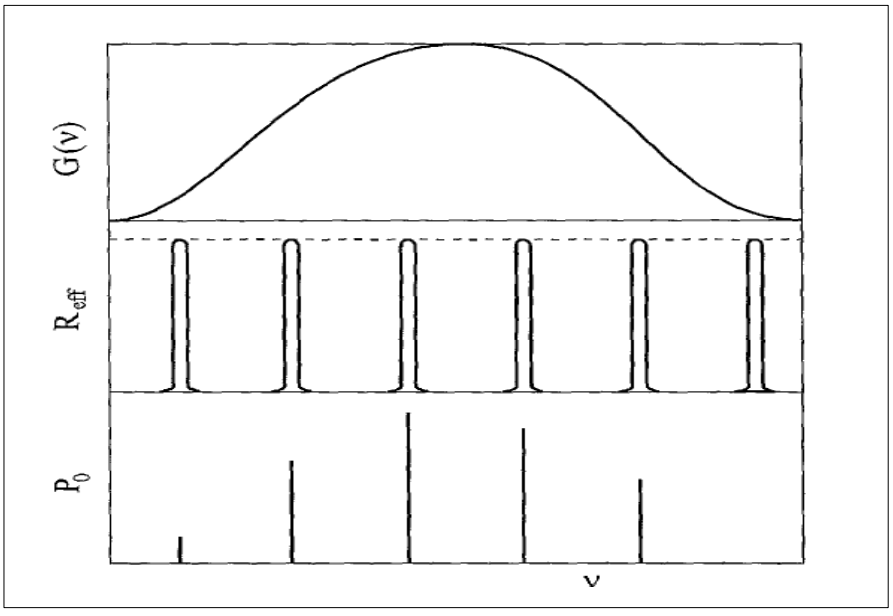
$$\Delta\lambda = \lambda^2/2d \qquad (63.1)$$

او بدلالة التردد:

$$\Delta\nu = C/2d \qquad (64.1)$$

وبالتالي في الليزر يكون الانعكاس الفعال مساويًا لـ R فقط عند ترددات منفصلة بـ $\Delta\upsilon$.

توضح **الصورة. 19.1** تأثير التجويف على الليزر الصادر. يوضح المنحنى العلوي الكسب G كدالة للتردد. يرسم المنحنى المركزي R_{eff} كدالة التردد. R_{eff} كبير (في هذا المثال) عند خمس نقاط فقط في فاصل التردد الذي يكون G فيه كبيرًا. كما يوضح المنحنى السفلي، يتذبذب الليزر عند هذه الترددات الخمسة المنفصلة فقط. يُعرف كل تردد بالنمط الطيفي أو النمط المحوري.



الصورة 19.1. التذبذب في عدة أنماط طيفية[52].

تكون الأنماط أحادية اللون تقريبًا أكثر بكثير مما يوحي به منحنى R_{eff}. في كثير من الحالات يتم تحديد عرضهم الطيفي فقط من خلال الاهتزازات الدقيقة التي تتسبب في تغيير الطول البصري للتجويف بشكل طفيف خلال فترات زمنية قصيرة. حدتها هي نتيجة التضخيم الصافي العالي للغاية الذي يحدث بعد عدد كبير من الانعكاسات، بعد كل رحلة ذهابًا وإيابًا يتم تضخيم التردد المركزي أكثر من الترددات القصوى. ينتج عن هذا شحذ الطيف. عندما يزداد التجويف، يكون عدد الرحلات ذهابًا وإيابًا كبيرًا جدًا، وبالتالي يصبح الطيف حادًا للغاية[52].

6.10 الأنماط العرضية (Transverse Modes):

يمكن فهمها بسهولة من حيث التجويف مثل التجويف البؤري. يحتوي التجويف البؤري الموضح في **الصورة. 20.1 (أ)** على مرآتين متطابقتين مع تركيز مشترك في منتصف المسافة بينهما بشكل تقريبي، يمكننا تعريف النمط العرضي على أنه توزيع المجال الكهربائي المرتبط بأي شعاع هندسي يتبع مسارًا مغلقًا. (لن نفكر في التجاويف التي لا تسمح للشعاع باتباع مسار مغلق، تُعرف هذه التجاويف بالرنان غير المستقر) وبطبيعة الحال، لن يصف الشعاع التوزيع الدقيق للمجال بسبب تأثيرات الانعراج[52].

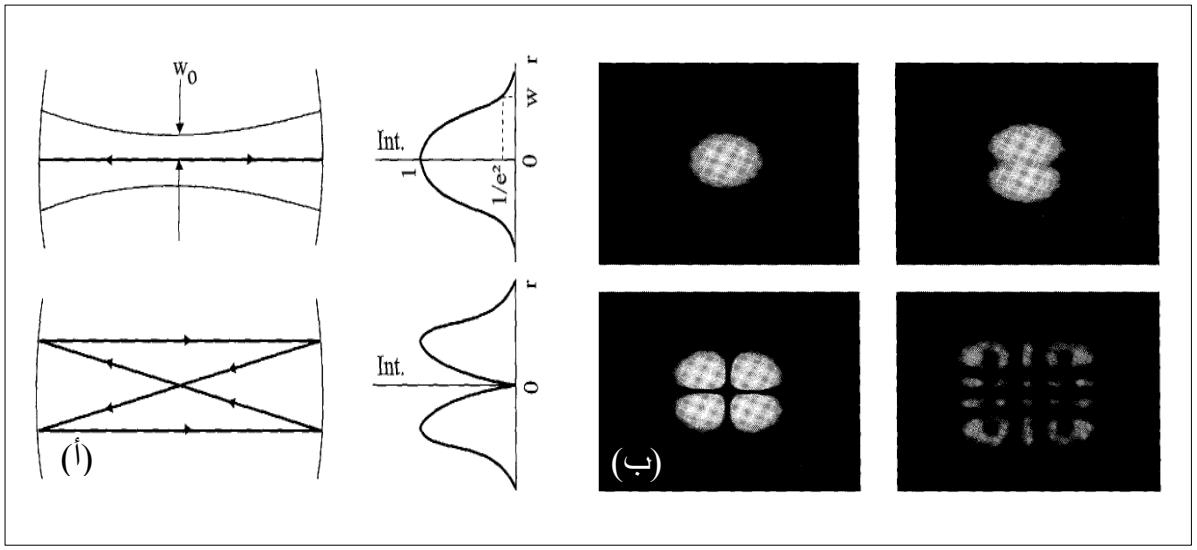
أبسط نمط في تجويف متحد البؤر يوصف بواسطة شعاع ينتقل ذهابًا وإيابًا على طول المحور. هذا هو النمط 00. بسبب الانعراج ، فإن توزيع الكثافة الفعلي هو الذي تم تحديده. ناتج الليزر المتذبذب في هذا الوضع هو موجة كروية بتوزيع شدة غاوسية. عادة ما يتم التعبير عن نصف قطر الحزمة على أنه نصف القطر w حيث تنخفض شدة الحزمة إلى $1/ e^2$ من قيمتها القصوى. الحد الأدنى لقيمة نصف القطر هو w_0 ويحدث عند خصر الحزمة في وسط التجويف.

تظهر **الصورة. 20.1 (ب)** النمط التالي الأبسط. لن يتأرجح هذا النمط إلا إذا كانت الفتحة (التي يتم تحديدها غالبًا بواسطة أنبوب الليزر) كبيرة بدرجة كافية. الناتج عبارة عن موجة كروية بتوزيع الكثافة الموضح. تتوافق أوضاع الترتيب الأعلى للمسارات المغلقة مع عدد أعلى من الانعكاسات المطلوبة لإكمال رحلة ذهابًا وإيابًا.

يتم تصنيف الانماط المستعرض وفقًا لعدد الحدود الدنيا التي يتم مواجهتها عند مسح الحزمة أفقياً (الرقم الأول) ثم عموديًا (الرقم الثاني). جميع الأنماط المبينة لها تناظر مستطيل، تصف هذه الأنماط المستطيلة جميع أنواع الليزر تقريبًا، حتى تلك التي تحتوي على قضبان أو أنابيب أسطوانية.

من الناحية العملية، فإن أنماط الرتبة الأعلى لها خسارة أكبر (بسبب الانعراج) من النمط 00. الليزر الذي يتأرجح في تراكب لأنماط الرتب الأعلى والنمط 00 يسمى ليزر متعدد الأنماط. يوفر الليزر متعدد الأنماط طاقة أكبر بكثير من الليزر أحادي النمط، ولكن الشعاع يركز أيضًا على بقعة أكبر. نتيجة لذلك قد لا يكون الإشعاع عند النقطة المحورية للعدسة أكبر بشكل ملحوظ من إشعاع الليزر أحادي النمط. بالإضافة إلى ذلك لا يُظهر الليزر متعدد

الأنماط تماسكًا مكانيًا عاليًا. وبالتالي غالبًا ما يكون الليزر أحادي النمط هو الأفضل في العديد من أجهزة الليزر الغازية[52].



الصورة. 20.1 - (أ) الأنماط العرضية في تجويف متحد البؤرة، (ب) بعض الأنماط العرضي بالليزر[52].

11. خصائص الحزمة الغاوسية (Gaussian Beam):

يطلق على شعاع الضوء المنبعث من ليزر ذي توزيع كثافة Gaussian "النمط الأساسي" أو النمط TEM_{00}. نظرًا لأهميتها ، تمت مناقشتها هنا بمزيد من التفصيل. يتم وصف انخفاض سعة المجال مع المسافة r من المحور في حزمة غاوس بواسطة:

$$E(r) = E_0 exp\left(\frac{-r^2}{w^2}\right) \qquad (65.1)$$

وبالتالي فإن توزيع كثافة الطاقة هو:

$$I(r) = I_0 exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) \qquad (66.1)$$

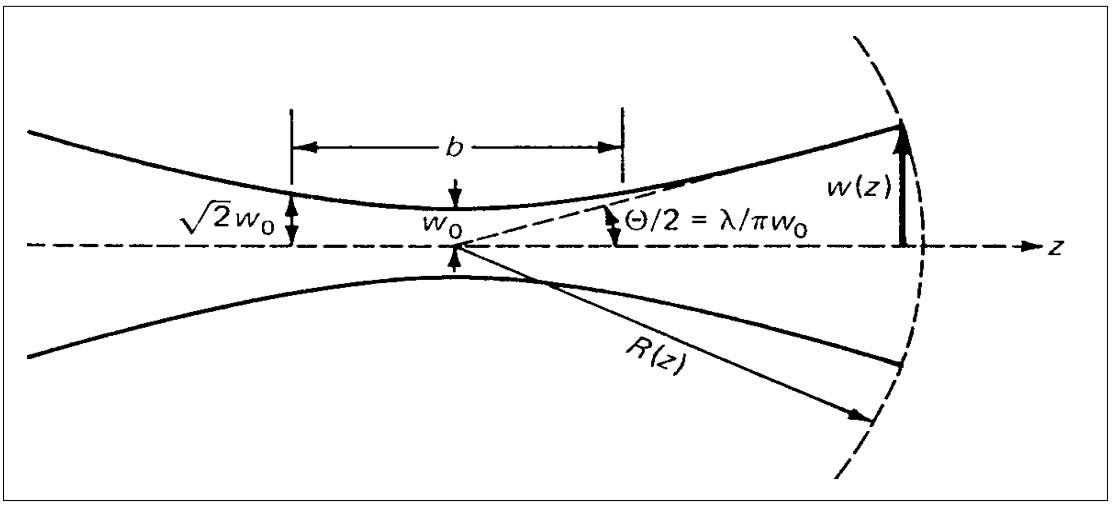
الكمية w هي المسافة القطرية التي ينخفض عندها اتساع المجال إلى 1/e من قيمته على المحور، وتنخفض كثافة الطاقة إلى $1/e^2$ من قيمتها المحورية. غالبًا ما يُطلق على المتغيرة w نصف قطر الحزمة أو "حجم البقعة" و 2w قطر الحزمة. جزء الطاقة الكلية لحزمة غاوسية الموجودة في فتحة نصف قطرية من r = w، و r = 1.5w، و r = 2w هي 86.5% ، 98.9% ، و 99.9%. إذا تم تمرير شعاع غاوسي من خلال فتحة قطرية مقدارها 3w، فسيتم فقد 6-10% فقط من قدرة الحزمة بسبب العائق. بالنسبة لمناقشتنا اللاحقة، فإن "الفتحة اللانهائية" تعني الفتحة القطرية التي تزيد عن ثلاثة مرات ابعاد البقعة[4].

إذا اعتبرنا الآن حزمة غاوسية منتشرة، نلاحظ أنه على الرغم من أن توزيع الكثافة هو غاوسي في كل مقطع عرضي للحزمة، فإن عرض توزيع كثافة الطاقة يتغير على طول المحور. يتقلص الشعاع الغاوسي إلى الحد الأدنى للقطر $2w_0$ عند خصر الحزمة حيث تكون مقدمة الطور مستوية. إذا تم قياس z من هذا الخصر، فإن قوانين الانتشار للحزمة تتخذ شكلاً بسيطًا. ابعاد البقعة على مسافة z من خصر الحزمة يتمدد على شكل قطع زائد والذي له الشكل:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (67.1)$$

يميل خطه المقارب بزاوية $\Theta/2$ مع المحور كما هو موضح في **الصورة. 21.1**، ويحدد زاوية تباعد المجال البعيد للحزمة الناشئة. يتم إعطاء زاوية التباعد الكاملة للنمط الأساسي بواسطة:

$$\Theta = \lim_{z\to\infty} \frac{2w(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \qquad (68.1)$$



الصورة. 21.1 - مخطط الحزمة الغاوسية [4].

على مسافات كبيرة بما فيه الكفاية من وسط الحزمة، يكون للموجة جبهة موجة كروية تظهر وكأنها تنبثق من نقطة على محور الحزمة عند الخصر.

إذا كان R(z) هو نصف قطر انحناء جبهة الموجة التي تتقاطع مع المحور عند z، فإن:

$$R(z) = z\left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right] \qquad (69.1)$$

من المهم أن نلاحظ أنه في الحزمة الغوسية، فإن واجهة الموجة لها نفس الطور عبر سطحها بالكامل.

في بعض الأحيان يتم وصف خصائص حزمة النمط TEM_{00} عن طريق تحديد متغيرة متحد البؤر:

$$b = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda} \qquad (70.1)$$

حيث b هي المسافة بين النقطتين عند كل جانب من خصر الحزمة التي من أجلها $w(z) = (2)^{1/2} w_0$ **الصورة. 21.1**.

تتميز الحزمة الغوسية بكثافة طاقة الذروة I_0 في المركز ونصف قطر شعاع الخصر w_0

$$I(r) = I_0 exp(-2r^2/w_0^2) \qquad (71.1)$$

حيث b هي المسافة بين النقطتين عند كل جانب من خصر الحزمـــة التي من أجلهـــا $w(z) = (2)\ 1\ /\ 2w_0$ **الصورة. 21.1**.

يتم الحصول على إجمالي الطاقة P في الحزمة من خلال التكامل عبر المقطع العرضي:

$$P = \int I(r) 2r\pi dr \qquad (72.1)$$

التي تؤدي إلى:

$$P = \pi w_0^2 I_0/2 \qquad (73.1)$$

بالنسبة لشعاع غاوسي، تكون الطاقة الإجمالية: نصف شدة الذروة مضروبة في مساحة المنطقة المحددة بنصف قطر الحزمة w_0[4].

12. خصائص حزمة أشعة الليزر (Properties of laser beams):

يتميز شعاع الليزر بدرجة عالية جدا من:

- أحادية اللون (Monochromaticity)
- الترابط (Coherence)
- الاتجاهية (Directionality)
- السطوع (Brightness)

1.12 أحادية اللون (monochromaticity):

تعني ان شعاع الليزر له عرض طيفي ضيق ينتج عنه تردد مفرد نقي، و هذه الصفة الموجية كانت تتميز بها الأشعة الراديوية دون سواها.

تنشأ هذه الخاصية عن امرين الأول: امكانية تضخيم شبه انتقائي للموجات الكهرومغناطيسية ذات التردد υ والثاني: وهو كون المرآتين تشكلان مجاوبة فالتذبذب يحدث فقط عند الترددات الرئيسية لهذه المجاوبة. وهذا يؤدي إلى كون عرض الخط الليزري أضيق بكثير، أكثر من 10 مراتب من قيمة عرض خط الانتقال 2 الى 1 في الإصدار التلقائي[56].

2.12 الترابط (coherence):

من الممكن إدخال المفهومين الآتيين للترابط لأي موجة كهرومغناطيسية و هما الترابط المكاني Spatial و الترابط الزماني Temporal.

لتوضيح الترابط المكاني نتصور نقطتين P_1 و P_2 في اللحظة $t = 0$ تكونان على نفس صدر الموجة الكهرومغناطيسية. و نفرض ان الحقل الكهربائي عند هاتين النقطتين $E_1(t)$ و $E_2(t)$ على التوالي. و من الواضح ان فرق الطور بين هذين الحقلين يساوي الصفر عند $t = 0$. و الآن إذا بقي فرق الطور صفر لأي زمن $t > 0$ فيقال عندئذ أنه يوجد ترابط تام perfect coherence بين النقطتين. و إذا تحقق هذا لأي نقطتين من صدر الموجة فيقال أن الموجة لها ترابط مكاني تام. من الناحية التطبيقية لكي نحصل على ترابط جيد للطور، لأي نقطة P_1 يجب أن تقع النقطة P_2 ضمن منطقة محددة حول النقطة P_1 .و في هذه الحالة يقال أن الموجة لها ترابط مكاني جزئي و يمكننا عند أي نقطة P إدخال سطح ترابط معين $S_c(p)$.

و لتوضيح الترابط الزماني نتصور المجال الكهربائي للموجة الكهرومغناطيسية عند نقطة معينة P في اللحظتين t و $t + \tau$.إذا بقي فرق الطور بين الحقلين ثابتا بعد تأخر زمني محدد τ. و بقي ثابتا لأي زمن t فيقال إنه يوجد ترابط زماني خلال الفترة الزمنية τ و إذا تحقق هذا لأي قيمة لـ τ فيقال أن الموجة الكهرومغناطيسية لها ترابط زماني تام أما أذا تحقق هذا لتأخر زمني τ بحيث أن $0 < \tau < \tau_0$ فيقال أن الموجة تملك ترابط زماني جزئي بزمن ترابطه τ_0[56].

3.12 الاتجاهية (directionality):

الاتجاهية هي سمة من سمات ضوء الليزر التي تسبب له الانتقال في اتجاه واحد ضمن نطاق ضيق. جميع انواع الضوء تنتشر بحزمة في نهاية المطاف تتباعد، ولكن ضوء الليزر هو اكثر اتجاهية من اي ضوء تقليدي من اي مصدر، اي يكاد التشتت او التفرق يكون معدوم.

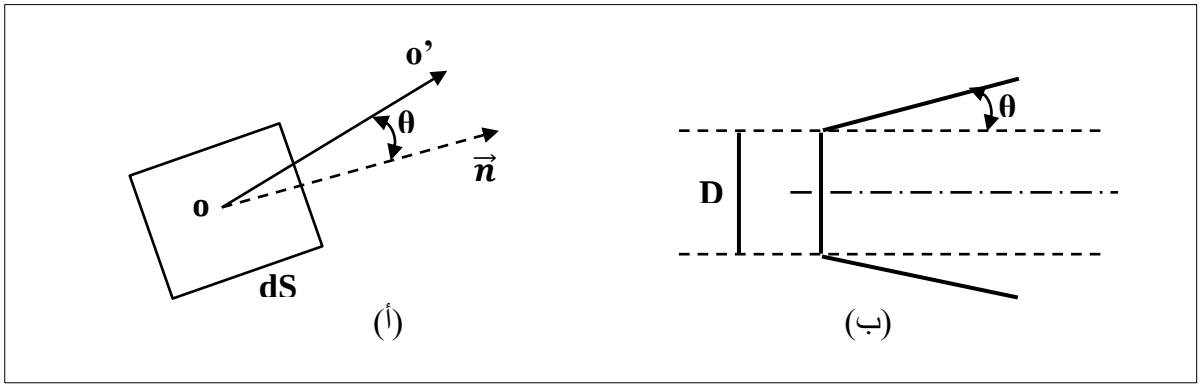
إن خاصية الاتجاهية هي نتيجة مباشرة لكون أن المادة الفعالة موضوعة داخل مجاوبة مثل المرآتين المستويتين و الحقيقة هي أن تلك الأشعة التي تسير على طول محور المجاوبة (و التي تسير مجاورة له) هي وحدها التي تطيل البقاء داخل المجاوبة.

4.12 السطوع (brightness):

يعرف سطوع المنبع للموجات الكهرومغناطيسية بأنه القدرة الصادرة عن واحدة المساحة من السطح لكل وحدة زاوية مجسمة. يمكن تمثيل القدرة المنبعثة من dS و ضمن زاوية مجسمة dΩ حول الاتجاه 'oo **الصورة. 22.1 (أ)** بالعلاقة:

$$dP = B\cos\theta dS d\Omega \qquad (74.1)$$

حيث θ الزاوية بين 'oo و الناظم n على السطح. تعرف الكمية B من المعادلة (27) و تدعى سطوع المنبع source brightness في النقطة O في الاتجاه 'OO. الكمية B من المعادلة (77.1) تدعى سطوع المنبع في النقطة O في الاتجاه 'OO.



الصورة. 22.1 - (أ) سطح السطوع في النقطة O من اجل منبع عام لأمواج كهرومغناطيسية (ب) سطوع الحزمة الليزرية ذات القطر D و زاوية تفرق θ[56].

ففي الليزرات ذات الاستطاعة المعتدلة (مثلا بضعة ميلي واط) يكون سطوعه عدة مراتب اكثر من أسطع المنابع التقليدية المألوفة. و هذا يعود بالدرجة الأولى إلى الخصائص الاتجاهية العالية لحزمة أشعة الليزر، أن ذروة الشدة الناتجة في المستوي البؤري لعدسة ما تكون اكبر بعدة مراتب من حزمة المنابع التقليدية و بالتالي فإن الحزمة الليزرية المتمحرقة يمكن أن تصل الى قيم عالية جدا وهذه ظاهرة يمكن الاستفادة منها في تطبيقات الليزر[56].

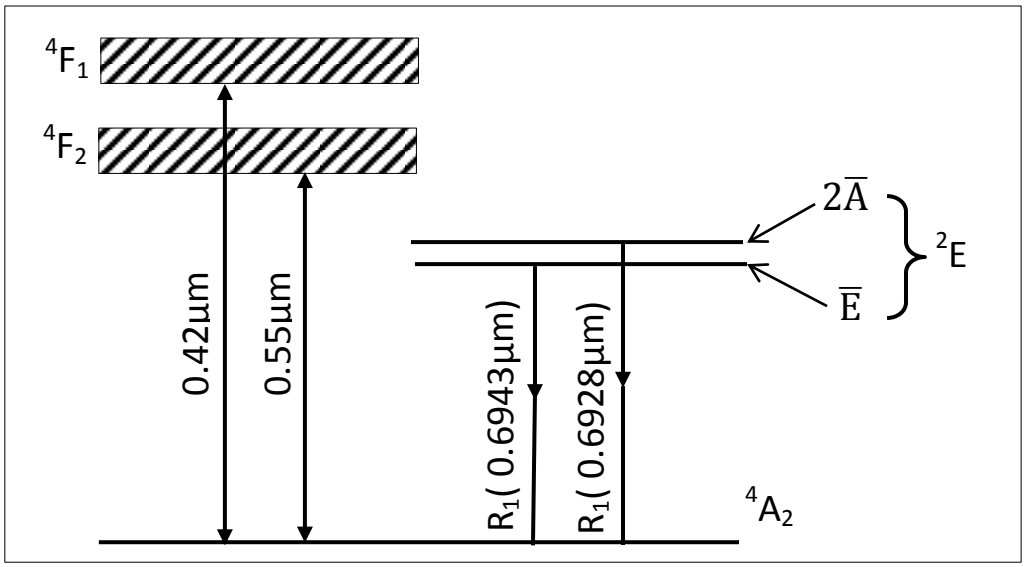
13. ليزرات الحالة الصلبة المعروفة:

يقصد بليزرات المواد الصلبة عادة تلك التي يكون الوسط الفعال (active medium) أما بلورة عازلة أو زجاج، إن ليزرات الحالة الصلبة غالبا ما تكون فيها المواد الفعالة عبارة عن أيونات شائبة داخل البلورات الأيونية.

و الايون عادة أحد المركبات من سلسلة العناصر الانتقالية في الجدول الدوري (مثل أيونات الفلز الانتقالي و من أبرزها Cr^{3+}، أو أيونات الأتربة النادرة و من ابرزها Nd^{3+} و Ho^{3+}. إن الانتقالات التي تحصل في العمل الليزري تشمل حالات تعود إلى الطبقات الداخلية غير الممتلئة لذلك فإن هذه الانتقالات لا تتأثر بقوة بالحقل البلوري. و هذا بدوره يعني أن هذه الانتقالات تكون الى حد بعيد حادة (أي أن σ نوعا ما كبيرة)[56].

1.13 ليزرات الياقوت (The ruby laser) :

إن ليزر الياقوت هو أول أنواع الليزرات و لا يزال مستعملا حتى الآن. و قد عرف الياقوت منذ مئات السنين كأحد الأحجار الكريمة الطبيعية و يتكون مـن بلورة Al_2O_3 (الكورندم Corundum) و قد حلت أيونات Cr^{3+} محل بعض أيونات Al^{3+}. أما مادة الليزر فيحصل عليها بواسطة إنماء البلورة من منصهر مزيج من Cr_2O_3 بنسبة (0.05% تقريبا وزنا) و Al_2O_3. إن سويات الطاقة لليزر هي سويات أيون الكروميوم في التركيب البلوري لـ Al_2O_3 و سويات الطاقة الأساس مبينة في **الصورة. 23.1** يحدث الفعل الليزري عادة بالانتقال من السوية E إلى السوية $^4A_2$ و يعطى الخط الأحمر R_1 الذي طول موجته تساوي تقريبا 694.3nm للياقوت نطاقين ضخ رئيسيين هما $^4F_1$، $^4F_2$ متمركزين عند الطول الموجي 0.55µm (الأخضر) و 0.42µm (البنفسجي) على التوالي.



الصورة. 23.1 - مستويات الطاقة للياقوت[56].

إن هذين النطاقين يرتبطان مع كل من الحالتين $2\overline{A}$ و $\overline{E}$ بانحلال سريع غير مشع ($\sim 10^{-7}s$). و بما ان الحالتين الأخيرتين $2\overline{A}$ و $\overline{E}$ هما ايضا مرتبطتان ببعضهما بعض بانحلال سريع جدا غير مشع ($\sim 10^{-7}s$) فإنه يحدث توازن حراري بين إسكان السويتين، و بالنتيجة تكون السوية $2\overline{A}$ هي الاكثر اسكانا. إن فاصل التردد بين السويتين يساوي ($\sim 29cm^{-1}$) صغير بالمقارنة مع (Kt/h) و $\overline{E}$ على هذا فإن إسكان السويتين متساويين، ومن ثم من المحتمل أيضا الحصول على الفعل الليزري من الانتقال الى $^4A_2$ (الخط R_2 $\lambda_2 \approx 0.6928\mu m$) و

ذلك مثلا باستعمال أنظمة التشتت. و على الرغم من التعقيدات في الحصول على الانتقال الليزري لهذين الخطين، فإن من الواضح أن ليزر الياقوت يعمل كليزر ذي سويات ثلاثة.

ان ليزرات الياقوت تشتغل عادة بالنظام النبضي Pulsed regime و يستعمل للتشغيل مصباح الزينون الوميضي بضغط (500 Torr ~). كما يمكن تشغيلها بنظام الموجه المستمرة cw، إذ يتم الضخ بمصباح زئبقي ذي ضغط عال.

لقد شاع استعمال ليزرات الياقوت في الماضي أما في الوقت الحاضر فقل استعمالها حيث حلت محلها ليزرات النيوديميوم- ياغ (Nd: YAG) و نيوديميوم-زجاج (Nd: glass) نظرا لأن ليزر الياقوت يشتغل على أساس مخطط ليزر الثلاث سويات فإن حد العتبة لطاقة الضخ حوالي رتبة واحدة أكبر مما عليه في حالة ليزر النيوديميوم- ياغ المساوي له بالحجم. و على كل حال لا تزال ليزرات الياقوت تستخدم في عدد من التطبيقات العلمية مثل الهولوغرافيا النبضية و في تجارب تحديد المدى (من ضمنها مقاييس المدى العسكرية)[56].

2.13 ليزرات النيوديميوم (Neodymium Lasers):

تعد ليزرات النيوديميوم من أكثر الليزرات الصلبة شيوعا و يتكون الوسط الليزري إما من بلورة $Y_3Al_5O_{12}$ (و عادة يطلق عليها ياغ YAG، و كلمة ياغ متكونة من الأحرف الأولى لـ Yttrium aluminum garnet) الذي فيه قسم من ايونات Y^{3+}، حلت محلها أيونات Nd^{3+}، أو ابسط من ذلك الزجاج المطعم بأيونات Nd^{3+}. إن ليزرات النيوديميوم يمكنها أن تتذبذب عند عدة خطوط. أقوى هذه الخطوط و أكثرها استعمالا هو الخط $\lambda = 1.064\ \mu m$.

يلخص **الجدول. 2.1** الخصائص الحرارية لـ Nd : YAG ، و يلخص **الجدول. 3.1** بعض الخصائص الفيزيائية و البصرية المهمة لـ Nd : YAG .

الجدول. 2.1 - الخصائص الحرارية للـ Nd:YAG[4].

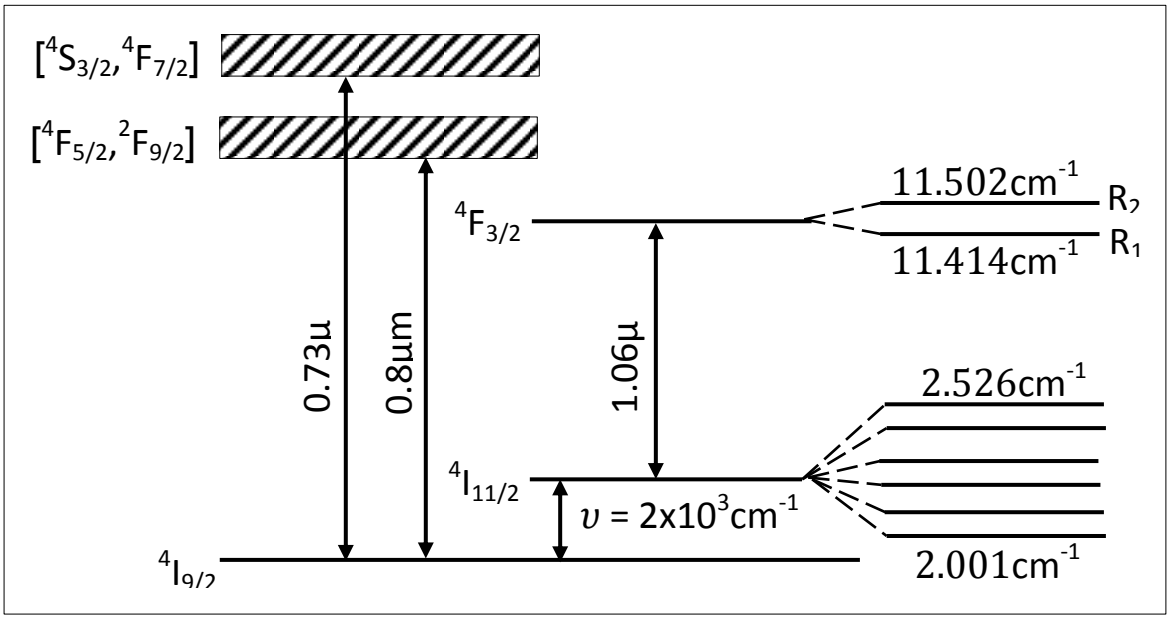
Property	Units	300 K	200 K	100 K
Thermal conductivity	$W\,cm^{-1}\,K^{-1}$	0.14	0.21	0.58
Specific heat	$W\,s\,g^{-1}\,K^{-1}$	0.59	0.43	0.13
Thermal diffusivity	$cm^2\,s^{-1}$	0.046	0.10	0.92
Thermal expansion	$K^{-1} \times 10^{-6}$	7.5	5.8	4.25
$\partial n/\partial T$	K^{-1}	7.3×10^{-6}	—	—

الجدول. 3.1 - الخصائص البصرية و الفيزيائية لـ Nd:YAG[4].

Chemical formula	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$
Weight % Nd	0.725
Atomic % Nd	1.0
Nd atoms/cm^3	1.38×10^{20}
Melting point	1970° C
Knoop hardness	1215
Density	4.56 g/cm^3
Rupture stress	$1.3–2.6 \times 10^6$ kg/cm^2
Modulus of elasticity	3×10^6 kg/cm^2
Thermal expansion coefficient	
[100] orientation	8.2×10^{-6} °C^{-1}, 0–250° C
[110] orientation	7.7×10^{-6} °C^{-1}, 10–250° C
[111] orientation	7.8×10^{-6} °C^{-1}, 0–250° C
Linewidth	120 GHz
Stimulated emission cross section	
$R_2 - Y_3$	$\sigma = 6.5 \times 10^{-19}$ cm^2
$^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$	$\sigma = 2.8 \times 10^{-19}$ cm^2
Fluorescence lifetime	230 μs
Photon energy at 1.06 μm	$h\nu = 1.86 \times 10^{-19}$ J
Index of refraction	1.82 (at 1.0 μm)

1.2.13 الخصائص الليزرية لـ Nd:YAG:

تمثل **الصورة. 24.1** مخطط مبسط لسويات طاقة Nd : YAG و هو تقريبا نفس المخطط لسويات طاقة Nd : glass لأن سويات الطاقة المستخدمة، كما سبق شرحه لا تتأثر تأثيرا قويا بالحقل البلوري. إن الانتقال الليزري عند الخط $\lambda = 1.064$ µm هو الأقوى من بين الانتقالات $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. إن نطاقي الضخ الرئيسيين هما عند 0.73µm و 0.8µm على التوالي. و يرتبط هذان النطاقان بوساطة الانحلال غير المشع مع المستوى $^4F_{3/2}$. في حين ترتبط السوية السفلية $^4I_{11/2}$ أيضا بانحلال غير مشع مع السوية الارضية $^4I_{9/2}$ فضلا عن ذلك فإن فرق الطاقة بين السويتين $^4I_{11/2}$ و $^4I_{9/2}$ هو تقريبا رتبة واحدة أكبر من Kt و لذلك فإن ليزر النيوديميوم يشتغل على اساس مخطط الاربع سويات.



الصورة. 24.1 - مستويات الطاقة بصورة مبسطة لـ Nd:YAG [56].

إن ليزرات Nd : YAG يمكنها أن تعمل بنظام الموجة المستمرة cw أو بالنظام النبضي. و في كلتا الحالتين تستخدم مصابيح خطية، تستعمل مصابيح الزينون Xe ذات الضغط المعتدل (Torr 1500 – 500) و مصابيح الكريبتون kr ذات الضغط العالي (4-6 ضغط جوي) للتشغيل النبضي و المستمر على التوالي.

تستعمل ليزرات Nd : YAG على نطاق واسع في مجموعة متنوعة من التطبيقات منها معالجة المواد أثناء الصنع، وفي تعيين المدى و في الجراحة. و من التطبيقات المهمة جدا لليزر Nd : glass أنها تستخدم كمضخات الليزر في الأنظمة ذات الطاقة العالية جدا و التي تستخدم في تجارب الاندماج النووي[56].

14. تطبيقات الليزر:

الخصائص الفريدة لضوء الليزر هي التي تجعل الليزر مميزًا للغاية. لا تبدو القدرة على إنتاج شعاع ضيق أمرًا مثيرًا للغاية، ولكنها العامل الحاسم في معظم تطبيقات الليزر. نظرًا لأن شعاع الليزر ضيق جدًا، يمكنه قراءة المعلومات الدقيقة والمشفرة الموجودة على قرص مضغوط CD أو أنماط الباركود في محل بقالة. نظرًا لأن شعاع الليزر ضيق جدًا، يمكن تركيز الطاقة المتواضعة نسبيًا لليزر ثنائي أكسيد الكربون بقدرة 200 واط على شدة يمكنها قطع المعدن أو لحامها. نظرًا لأن شعاع الليزر ضيق جدًا ، يمكنه إنشاء أنماط دقيقة ورائعة في طابعة الليزر[58].

1.14 الليزر في الصناعة:

أحد تطبيقات الليزر الرائدة هو معالجة المواد، حيث يتم استخدام الليزر في القطع والحفر واللحام والمعالجة الحرارية، وتغيير كل من المعادن واللافلزات. يمكن لليزر حفر ثقوب صغيرة في شفرات التوربينات بسرعة أكبر وبكلفة أقل من المثاقب الميكانيكية. يتمتع الليزر بالعديد من المزايا مقارنة بالتقنيات التقليدية لقطع المواد. لسبب واحد على عكس شفرات المنشار أو شفرات السكين، لا يصبح الليزر باهتًا أبدًا. من ناحية أخرى يقوم الليزر بعمل قطع بجودة حواف أفضل من معظم القواطع الميكانيكية. نادرًا ما تحتاج حواف الأجزاء المعدنية المقطوعة بالليزر إلى رفعها او صقلها لأن الليزر يصنع مثل هذا القطع النظيف.

غالبًا ما يكون اللحام بالليزر أكثر دقة وأقل تكلفة من تقنيات اللحام التقليدية. علاوة على ذلك، يعد اللحام بالليزر أكثر توافقًا مع الروبوتات، ويقدم العديد من صانعي الأدوات الآلية الكبار أنظمة لحام بالليزر اوتوماتيكية بالكامل للمصنعين.

تتضمن المعالجة الحرارية بالليزر تسخين جزء معدني بضوء الليزر، مما يزيد من درجة حرارته إلى الحد الذي يتغير فيه هيكله البلوري. غالبًا ما يكون من الممكن تقوية السطح بهذه الطريقة، مما يجعله أكثر مقاومة للتآكل. تتطلب المعالجة الحرارية بعضًا من أقوى أنواع الليزر الصناعية، وهي أحد التطبيقات التي تكون فيها الطاقة الخام

لليزر أكثر أهمية من الشعاع الضيق. على الرغم من أن المعالجة الحرارية ليست تطبيقًا واسعًا لليزر الآن ، فمن المحتمل أن تتوسع بشكل كبير في السنوات القادمة[58].

2.14 الليزر في الاتصالات:

أحد أكثر تطبيقات الليزر إثارة هو مجال الاتصالات السلكية واللاسلكية، حيث تولد ليزر الصمام الثنائي الصغير الإشارة الضوئية المنقولة عبر الألياف الضوئية. نظرًا لأن عرض النطاق الترددي لأنظمة الألياف الضوئية هذه أكبر بكثير من عرض الأسلاك النحاسية التقليدية، فإن الألياف الضوئية تلعب دورًا رئيسيًا في تمكين الإنترنت سريع النمو. تنقل أنظمة اتصالات الألياف الضوئية الحديثة أطوال موجية متعددة من خلال ليف واحد، وهي تقنية تسمى مضاعفة تقسيم الطول الموجي. يعد تطور هذه التقنية، جنبًا إلى جنب مع مضخمات الألياف المشبعة بالإربيوم لتعزيز الإشارة في نقاط استراتيجية على طول خط النقل، قوة دافعة رئيسية في سوق الإلكترونيات الضوئية اليوم[58].

3.14 الليزر في البحث والطب:

بدأ استخدام الليزر في المعامل البحثية، ولا يزال العديد من أكثرها تطورًا هناك. يعتبر الكيميائيون وعلماء الأحياء وعلماء التحليل الطيفي وغيرهم من العلماء أن الليزر من بين أقوى أدوات البحث في العلوم الحديثة. مرة أخرى يعتبر شعاع الليزر الضيق ذا قيمة، ولكن في المختبر غالبًا ما تكون الخصائص الأخرى لضوء الليزر مهمة أيضًا. نظرًا لأن شعاع الليزر يحتوي على ضوء من هذا اللون النقي، فيمكنه أن يسبر ديناميكيات تفاعل كيميائي أثناء حدوثه أو يمكنه حتى تحفيز حدوث رد فعل. في الطب أثبت شعاع الليزر الضيق أنه أداة قوية للعلاج. على وجه الخصوص، تم اعتماد ليزر ثاني أكسيد الكربون على نطاق واسع من قبل الجراحين كمشرط غير دموي لأن الشعاع يكوي الشق حتى أثناء إجراءه. في الواقع كان من المستحيل إجراء بعض العمليات الجراحية التي تسبب نزيفًا غزيرًا قبل ظهور الليزر. وهو مفيد بشكل خاص في جراحة العيون لأن الشعاع يمكن أن يمر عبر بؤبؤ العين ويلحم أو يقطع أو يكوي الأنسجة داخل العين. قبل ظهور الليزر كان أي إجراء داخل العين يتطلب قطع مقلة العين.

و الأمر الأكثر إثارة هو الوعد بتقنيات جديدة وناشئة في طب الليزر. يعد إجراء الليزك (The LASIK)، باستعادة البصر المثالي لملايين الأشخاص. نظرًا لأن لون الليزر نقي جدًا، فقد يكون لديه القدرة على تدمير ورم مريض مع ترك الأنسجة المجاورة سليمة. بضع القرنية الشعاعية بالليزر - قطع عدة شقوق صغيرة بالليزر في القرنية - قد يجعل يومًا ما النظارات والعدسات اللاصقة قديمة بالنسبة لملايين الأشخاص. وقد يبسط رأب الأوعية بالليزر إلى حد كبير العمليات الجراحية للشريان التاجي التي تُجرى على مئات الآلاف من المرضى كل عام[58].

4.14 الليزر في الرسومات ومحلات البقالة:

طابعات الليزر قادرة على إنتاج مخرجات عالية الجودة بسرعات عالية جدًا. حتى عقد من الزمان، كانت طابعات الليزر أيضًا باهظة الثمن، ولكن يمكن الآن الحصول على طابعات ليزر متوافقة مع الكمبيوتر الشخصي مقابل بضع مئات من الدولارات. في طابعة الليزر "يكتب" الليزر على سطح إلكتروستاتيكي، والذي بدوره ينقل الحبر إلى الورق.

لليزر تطبيقات أخرى في الرسومات أيضًا. يكتب منسقوا التنضيد بالليزر مباشرة على ورق حساس للضوء، وينتجون نسخة جاهزة للكاميرا لصناعة النشر. تقوم فواصل الألوان بالليزر بتحليل صورة ملونة وإنشاء المعلومات التي تحتاجها الطابعة لطباعة الصورة بأربعة ألوان من الحبر. ينتج صانعوا ألواح الليزر ألواح الطباعة، أو السلبيات في بعض الحالات، بحيث يمكن طباعة الصحف مثل وول ستريت جورنال ويو إس إيه توداي في مواقع بعيدة عن مكاتب التحرير الخاصة بهم.

وقد رأى الجميع ماسحات الرمز الشريطي الليزرية في كشك الخروج في متجر البقالة المحلي. يقوم شعاع الليزر الضيق في هذه الأجهزة بمسح نمط الرمز الشريطي و تقرؤه تلقائيًا في كمبيوتر المتجر[58].

5.14 التطبيقات العسكرية لليزر:

حتى الآن وُجد أن الليزر يصنع أسلحة رديئة، ويعتقد العديد من العلماء أن التعقيدات الهندسية وقوانين الفيزياء قد تمنعها من أن تكون مفيدة بشكل خاص لهذا الغرض. ومع ذلك، فقد وجدت عدة آلاف من أجهزة الليزر تطبيقات عسكرية ليس في الأسلحة ولكن في محددات المدى ومحددات الأهداف.

يقيس جهاز تحديد المدى بالليزر الوقت الذي تستغرقه نبضة الضوء، عادةً من ليزر Nd: YAG، للانتقال من مكتشف المدى إلى الهدف والعودة. يقسم الكمبيوتر الموجود على اللوحة هذا الرقم إلى سرعة الضوء للعثور على المدى إلى الهدف. يضيء محدد الهدف بضوء الليزر، عادةً ضوء الأشعة تحت الحمراء من ليزر Nd: YAG. ثم تحط قطعة من الذخيرة "الذكية"، صاروخ أو قنبلة، مزودة بجهاز استشعار الأشعة تحت الحمراء وبعض آلية التوجيه على الهدف وتدمره.

يستخدم ليزر الصمام الثنائي أحيانًا للمساعدة في توجيه الأسلحة الصغيرة. يتم ضبط شعاع الليزر مسبقًا على طول مسار الرصاصة، ويمكن لشرطي أو جندي رؤية مكان إصابة الرصاصة قبل إطلاقها. يتم استخدام ليزر الصمام الثنائي كأجهزة تدريب عسكرية في مخطط تم تقليده من قبل مصنعي الألعاب المدنيين. يستخدم المتدربون البنادق التي تطلق رشقات نارية من ضوء ليزر الصمام الثنائي (بدلاً من الرصاص) ويرتدون مجموعة من الكاشفات الضوئية التي تسجل الضربة عندما يطلق الخصم النار عليهم[58].

15. الخلاصة:

تنبأ بوجود الليزر العالم البرت اينشتاين في 1917 حيث وضع الأساس النظري لعملية الانبعاث المحث stimulated emission وتم تصميم أول جهاز ليزر في 1960 بواسطة العالم ميمان T.H. Maiman [3] باستخدام بلورة الياقوت ويعرف بليزر الياقوت Ruby laser. يمكن القول ان الليزر ليس أكثر من ضوء خاص. تدخله الطاقة، عادة على شكل كهرباء او ضوء، و تتفاعل مع الوسط الفعال وفق ثلاثة آليات و هي الامتصاص و الاصدار التلقائي و الاصدار المحث هذا الاخير هو المسؤول الاساسي على انتاج الليزر.

الجدير بالذكر أنه من الضروري جداً إثارة عدد كبير من الذرات للحصول على ليزر وتسمى هذه العملية بعملية الضخ pumping للإلكترونات من المستوى الأرضي إلى مستوى الإثارة، في ليزرات الحالة الصلبة تتم هذه العملية في الغالب بواسطة الضوء الصادر من مصابيح غازية كهربائية او ليزر آخر، كما يمكن استعمال ضوء الشمس كمصدر للضخ و هو ما برهن عليه Kiss و من معه سنة 1963[6]. وسميت هذه التقنية بالليزر الشمسي و هي موضوع بحثنا هذا، لفهم التحديات التي ينطوي عليها استخدام ضوء الشمس كمصدر لضخ الليزرات، من الضروري فهم المورد (ضوء الشمس) بشيء من التفصيل و هو ما سنطرق اليه في الفصل الموالي.

الفصل الثاني

الشمس مصدر الطاقة

2.الشمس مصدر الضوء

1. مقدمة:

الشمس هي مصدر الطاقة على سطح الأرض ولولاها لما وجدت الحياة بشكلها الحالي على سطح كوكبنا، و قد أدرك الإنسان منذ القدم أهمية الشمس في حياته و لربما كانت قصة ارخميدس المشهورة المتعلقة باستخدام مرايا لتركيز الأشعة لإحراق سفن الأسطول الروماني عام 212 ق.م أولى الإشارات التي تدل على استعمال الإنسان للطاقة الشمسية.

تعد الطاقة الواردة إلينا من الشمس من أهم أنواع الطاقات التي يمكن للإنسان استغلالها فهي طاقة دائمة لا ينتج عن استخدامها غازات أو نواتج ثانوية ضارة بالبيئة مقارنة بالمصادر الأخرى. لقد أصبحت للطاقة الشمسية مكانتها اللائقة بين المصادر الأخرى للطاقة في الوقت الحاضر، و اعتمدت ميزانيات كبيرة في أغلب الدول لاستغلالها، كما تعددت الطرق المقترحة للاستفادة منها مثل استخدام المرايا العاكسة لتجميع ضوء الشمس و ابتكار طرق أخرى لامتصاص هذه الطاقة أو تحويلها الى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية وغيرها من الاستخدامات[59].

2. طبيعة الإشعاع الشمسي :

الشمس عبارة عن كرة غازية يبلغ قطرها 1.4 مليون كيلو متر و يبلغ وزنها 1.986×10^{30} kg و هو ما يعادل 99.87% من مجمل كتلة النظام الشمسي بأجمعه ، اما المسافة بين الأرض و الشمس فتقدر بحوالي 150×10^{6} km.

تتكون الشمس بصورة رئيسية من غاز الهيدروجين بنسبة 75% و غاز الهليوم بنسبة 24% ، فضلا على كميات ضئيلة من بعض العناصر الأخرى كالحديد و السيليكون و النيون و الكربون . و تتولد الطاقة الشمسية نتيجة التحول المستمر لكل أربع ذرات من الهيدروجين إلى ذرة واحدة من الهليوم في تفاعل اندماجي نووي، ولما كانت كتلة الهليوم الناتجة من التفاعل أقل من مجموع كتل ذرات الهيدروجين الداخلة فيه فإن فرق الكتلة هذا يتحول إلى ضوء وحرارة تنتقل على هيئة أشعة، يبلغ معدل انبعاثها 3.8×10^{23} kW و تشع هذه الكمية في جميع الاتجاهات . تتراوح درجة حرارة باطن الشمس ما بين (8 – 40°k) وتشكل كتلة باطن الشمس حوالي 40% من كتلة الشمس الكلية و كثافة باطن الشمس عالية تصل إلى 100 ضعف بقدر كثافة الماء ويحيط بقلب الشمس منطقة تعرف بمنطقة الحمل وتصل درجة حرارتها الى 130000 °k و كثافتها حوالي $70\ Kg/m^3$، أما الغلاف الغازي للشمس فيتكون من ثلاث طبقات رئيسية كما تبينه **الصورة. 1.2** هي[59]:

1.2 طبقة الفوتوسفير أو الكرة الضوئية (Photosphere) :

وهي الطبقة السطيحة الأولى للشمس وهي عبارة عن غاز متوهج يبدو كقرص لونه أصفر و كثيف، و هو السبب

في حجب رؤية ما في باطن الشمس. و سمك هذه الطبقة 300 Km و درجة حرارتها 5000°k و كثافتها واطئة جدا و تساوي $\rho = 10\text{-}5\ kg/m^3$ [59].

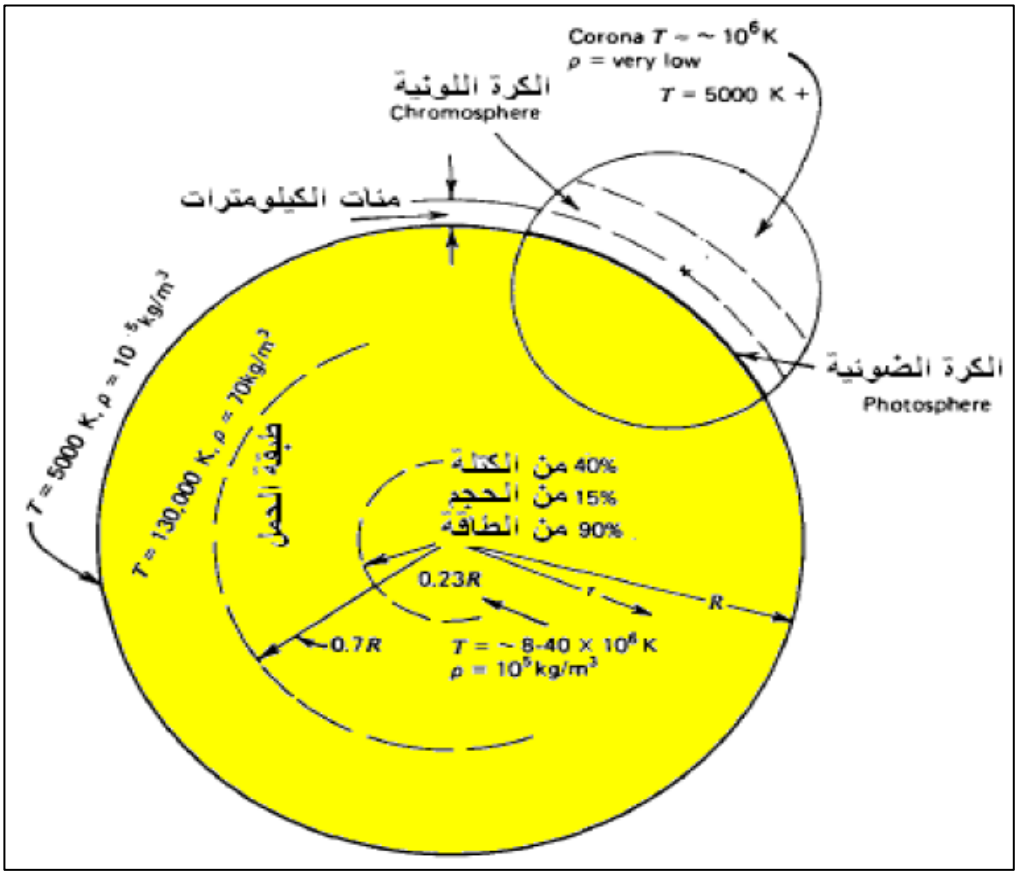
2.2 طبقة الكروموسفير أو الكرة اللونية (Chromosphere):

وهي الكرة التي تحيط بقرص الشمس و تبدو على شكل حلقة حمراء حول القمر عند حدوث الكسوف، وسمكها يتراوح بين (2000 - 3000 km) وتقوم هذه الطبقة بامتصاص الوان معينة من الطيف الشمسي[59].

3.2 الاكليل (Corona):

و هو الغلاف الشفاف العلوي للشمس، و هذه الطبقة تمتد الى ارتفاعات تصل بضعة ملايين من الكيلومترات و درجة حرارتها أعلى من الطبقات الاخرى و درجة حرارتها مرتفعة جدا تصل الى مليون درجة مطلقة و كثافتها منخفضة جدا.

لقد وجد بطرائق فيزيائية مختلفة ان درجة حرارة سطح الشمس المسمى بالفوتوسفير حوالي 6000k **الصورة. 1.2**. وتعتبر طبقة الفوتوسفير مصدر الاشعاع الرئيسي من الشمس تستقبل الارض$1.8\ x10^{14}Kw$ من طاقة الشمس و هي تعادل 20 الف مرة قدر الاستهلاك العالمي من الطاقة[59].



الصورة. 1.2 - نموذج بسيط للشمس[59].

3. المعاملات الاساسية للشمس:

منذ أواخر القرن التاسع عشر، جرت محاولات حثيثة لقياس كثافة قدرة الإشعاع الشمسي. وبعد ظهور الأقمار الصناعية، أصبحت بيانات الإشعاع الشمسي الموجود خارج الغلاف الجوي متاحة. ومن البيانات المتراكمة حتى اليوم، لم يتجاوز التغير في هذه الكثافة في الموقع المتوسط للأرض خارج الغلاف الجوي 0.1 بالمائة عبر قرن. وعلى الرغم من أن هذه الكمية التي رمزها S ليست ثابتًا فيزيائيًا، فهي عادة ما تُسمى الثابت الشمسي[60]:

$$S = 1366 \pm 3W/m^2 \qquad (1.2)$$

يمكن تقدير إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي $L_\odot$، أو ما يعرف « بالسطوع الشمسي » باستخدام الثابت الشمسي ومتوسط المسافة بين الشمس والأرض $A_\odot$، أو ما يُطلق عليه« الوحدة الفلكية للطول» [60]:

$$A_\odot = 1.5 \times 10^{11}m \qquad (2.2)$$

الذي يعطي (انظر **الصورة. 2.2**):

$$L_\odot = 4\pi A_\odot^2 S = 3.84 \times 10^{26}W \qquad (3.2)$$

إن إجمالي قدرة الإشعاع الشمسي يصل إلى نحو عشرين تريليون مرة استهلاك الطاقة الخاص بالعالم بأكمله 1.6×10^{13}W.[60].

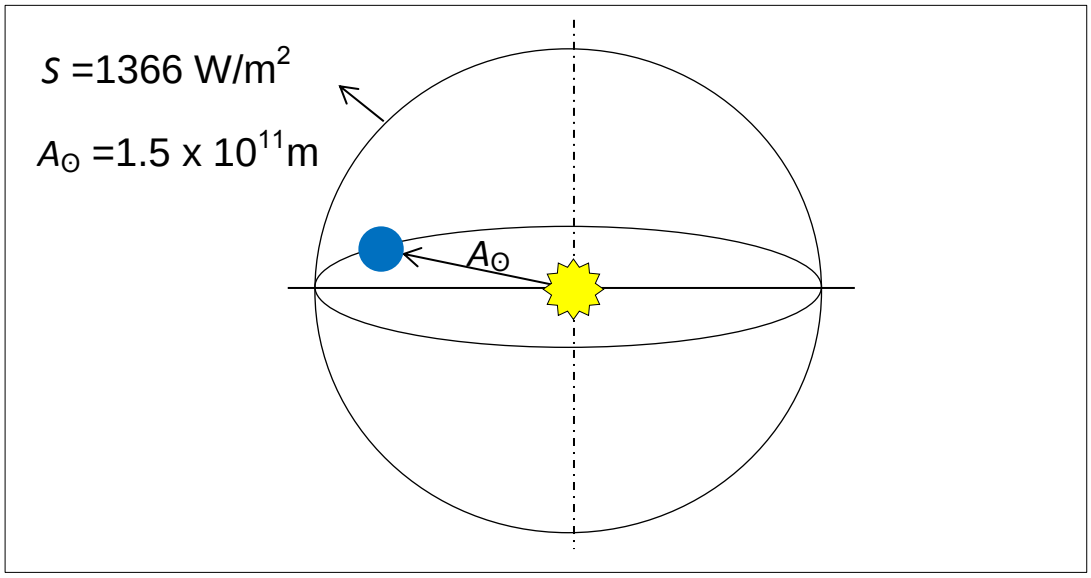
لقرون خضعت الشمس لدراسة مكثفة من جانب الفلكيين. ولقد فُهمتْ جيدًا المعاملات الأساسية والتركيب الأساسي للشمس. وفيما يلي موجز مختصر لها[60].

1.3 المسافة:

قيست المسافة بين الشمس والأرض باستخدام طريقة التثليث و« الأصداء الرادارية » ولأن مدار الأرض حول الشمس على شكل قطع ناقص، فالمسافة ليست ثابتة .ففي نحو الثالث من يناير(جانفي) من كل عام، تكون المسافة في أدنى قيمة لها «الحضيض $1.471x10^{11}$m» وفي نحو الثالث من يوليو(جوان) كل عام عند « الأوج » تكون المسافة في أقصى قيمة لها 1.521×10^{11}m، ويعامل متوسط المسافة باعتباره معاملا أساسيا في الفلك .

و الى جانب المسافة بالمتر، حدد بدقة عالية متوسط زمن وصول الضوء من الشمس الى الارض $\tau_\odot$، او ما يطلق عليه الزمن الضوئي للوحدة الفلكية للمسافة. و بالنسبة لكل التطبيقات العملية الخاصة بالطاقة الشمسية، فإن القيمة التقريبية لهذا الزمن المضبوطة لـ 0.2 بالمائة ، هي كالتالي[60]:

$$\tau_\odot = 500s \qquad (4.2)$$



الصورة. 2.2 – الثابت الشمسي S، و متوسط المسافة بين الارض و الشمس الثابت الفلكي $A_{\odot}$ [60].

2.3 الكتلة:

تقاس كتلة الشمس باستخدام قانون كبلر و المعاملات المدارية للكواكب، مرة اخرى بالنسبة لكل التطبيقات العملية، فإن القيمة التقريبية لتلك الكتلة المضبوطة لـ1 بالمائة هي كالتالي [60]:

$$m_{\odot} = 2 \times 10^{30} kg \qquad (5.2)$$

إنها تساوي 333 ألف مرة كتلة الارض. ونتيجة للإشعاع وطاقة الرياح، تفقد الشمس 1017 Kg من كتلتها كل عام، وهو أمر لا يذكر. عمليا كتلة الشمس ثابتة عبر عمرها.

3.3 نصف القطر:

يقاس نصف قطر الشمس من خلال القطر الزاوي للقرص المرئي. ولأن المسافة بين الشمس و الارض ليست ثابتة، فإن القطر الزاوي للشمس ليس ثابتا. وهو يتراوح بين '31.6 و'32.7 ومتوسط القيمة هي 32 دقيقة قوسية أو 0.533 درجة. وباستخدام متوسط المسافة $A_{\odot}$ يكون نصف قطر الشمس كما يلي[60]:

$$r_{\odot} = \frac{1.5 \times 10^{11} \times 0.533}{2 \times 57.3} m \cong 6.96 \times 10^{8} m \qquad (6.2)$$

وباستخدام القيمة السابقة، يكون حجم الشمس $1.412 \text{ x } 10^{27}$ m^3 ومتوسط كثافتها 1.408 g/cm^3 .

4.3 قدرة الانبعاث:

يمكن حساب قدرة انبعاث سطح الشمس بـ W/m^2، من خلال المعادلتين (2-3) و (2-6) [60]:

$$U_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r_{\odot}^2} = \frac{3.84 \times 10^{26}}{4\pi(6.96 \times 10^{8})} \cong 63.1 MW/m^2 \qquad (7.2)$$

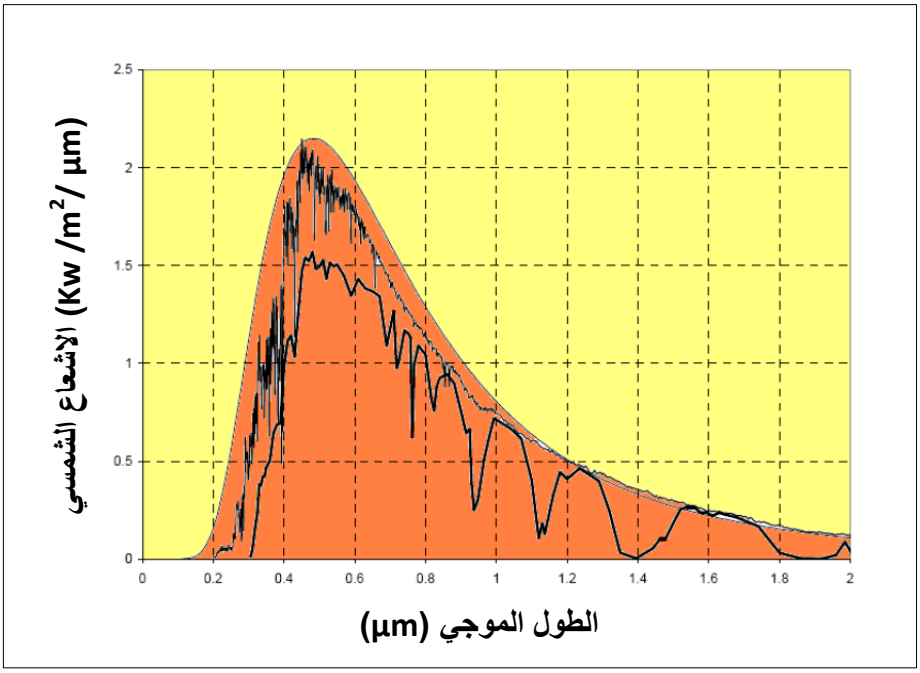
5.3 درجة حرارة السطح:

باعتبار الشمس جسما اسود يمكن حساب درجة الحرارة من خلال قانون ستيفان بولتزمان. فباستخدام (3-7) و (1-4) و ثابت بولتزمان [60]:

$$T_{\odot} = \left[\frac{U_{\odot}}{\sigma}\right]^{1/4} = \left[\frac{63.1 \times 10^{6}}{5.67 \times 10^{-8}}\right]^{1/4} \cong 5800K \qquad (8.2)$$

4. الطيف الكهرومغناطيسي:

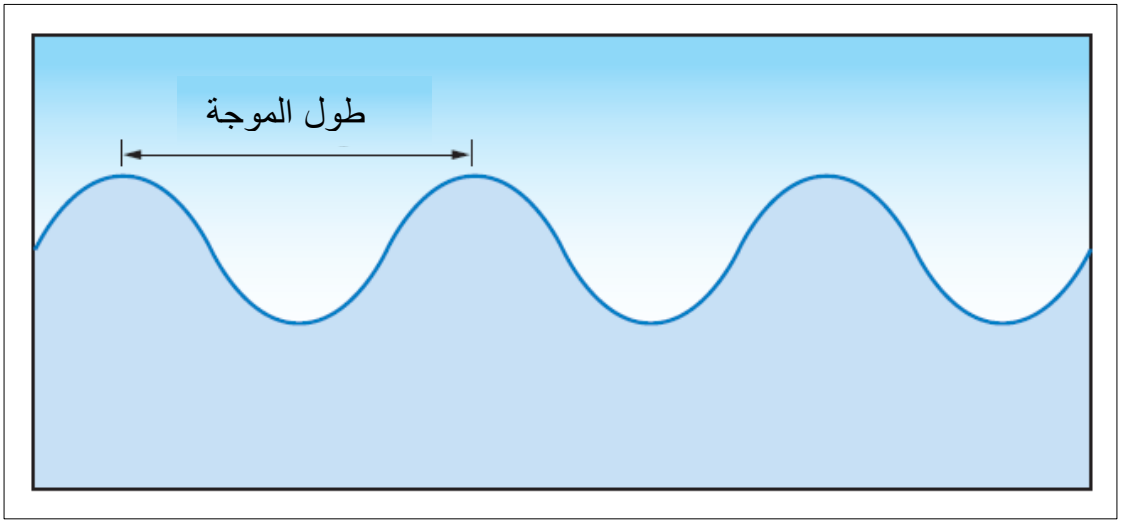
اذا أخذنا الجسم الأسود كنموذج للشمس عند درجة حرارة الاتزان فإن الفيض الإشعاعي المنبعث من سطح الشمس يمكن تمثيله بتوزيع بلانك على الرغم من الاختلاف البسيط لكون الشمس ليست في حالة توازن إشعاعي ولا حتى في حالة استقرار و احسن تقريب لطيف الشمس هو منحنى الجسم الأسود الذي يقابل درجة حرارة 5800k كما يلاحظ من **الصورة. 3.2**[59].



الصورة. 3.2 - نموذج الطيف المنبعث من الشمس[59].

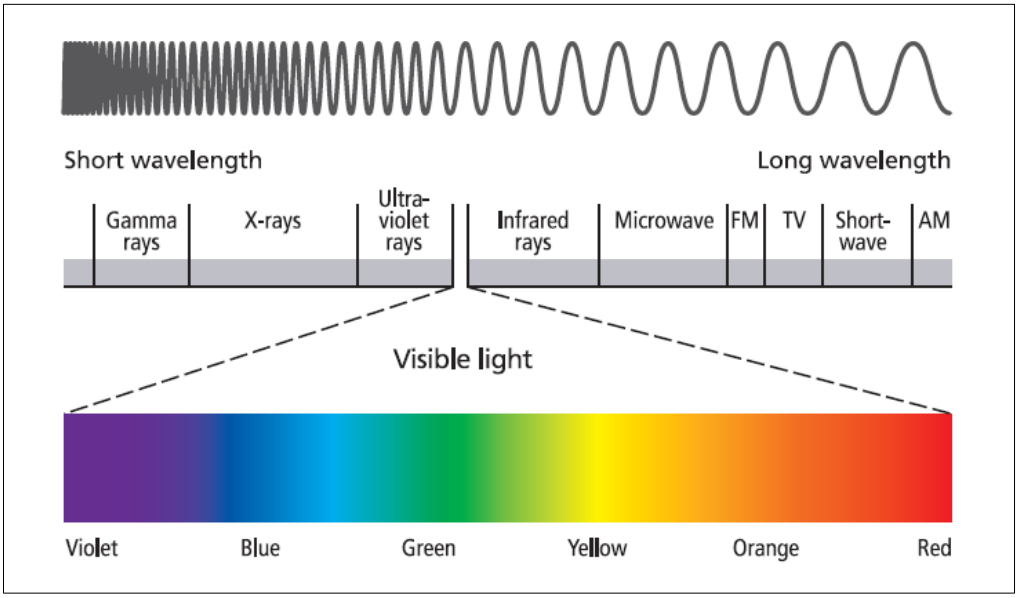
الاندماج النووي هو مصدر طاقة الشمس. في الجزء الداخلي من الشمس، يتم دمج ذرات الهيدروجين الأقل كتلة معًا لتكوين المزيد من ذرات الهيليوم الضخمة، وفي هذه العملية يتم إطلاق كميات هائلة من الطاقة. تبعث الشمس الطاقة بهذه الطريقة منذ عدة مليارات من السنين وتتنبأ النظرية بأن العملية ستستمر لمليارات السنين في المستقبل. ناتج الطاقة للشمس ثابت بشكل ملحوظ، حيث لا يتفاوت بأكثر من عُشر واحد بالمائة[61].

تبعث الشمس كمية هائلة من الطاقة، فقط جزء صغير منها تعترضه الأرض. تنتشر الطاقة عبر الفضاء على شكل موجات كهرومغناطيسية، وهي تغيرات دورية في شدة الطاقة الكهربائية والمغناطيسية. يمكن تصور هذه الاختلافات الدورية على أنها موجات جيبية كموجات الماء (**الصورة. 4.2**)، وفي هذه الحالة يكون الطول الموجي للموجة الكهرومغناطيسية هو المسافة من قمة احدى الموجات إلى قمة الموجة المجاورة. ربما تكون الموجات الضوئية وموجات الراديو من أكثر الأمثلة شيوعًا للموجات الكهرومغناطيسية. تتميز الموجات الكهرومغناطيسية أساسًا بأطوالها الموجية. موجات الراديو لها أطوال موجية طويلة إلى حد ما، وهي تختلف من متر إلى ملليمتر في الطول. تتميز الأشعة تحت الحمراء، التي يُنظر إليها على أنها حرارة بأطوال موجية كهرومغناطيسية تتراوح من حوالي عُشر المليمتر إلى حوالي 700nm، حيث يرمز الاختصار nm إلى النانومتر، أو واحد من المليار من المتر.



الصورة. 4.2 - مفهوم الطول الموجي (البعد بين قمتين متتاليتين لأمواج منتظمة)[61].

يتكون الضوء المرئي من إشعاع كهرومغناطيسي بأطوال موجية في حدود 700-400 نانومتر. ينظر إلى الأطوال الموجية المختلفة ضمن هذا الفاصل الزمني على أنها ألوان مختلفة (**الصورة.5.2**)، ويمكن رؤية الطيف الكامل للإشعاع الكهرومغناطيسي المرئي في قوس قزح حيث تظهر الأطوال الموجية الأطول باتجاه الحافة الخارجية لقوس قزح. اللون الأحمر هو اللون ذو الأطوال الموجية الأطول. تظهر الأطوال الموجية الأقصر بالقرب من الحافة الداخلية لقوس قزح. البنفسجي هو اللون ذو الأطوال الموجية الأقصر. الموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية الأقصر بكثير من حوالي 400 نانومتر أو أطول بكثير من 700 نانومتر لا يمكن رؤيتها بالعين البشرية. الموجات فوق البنفسجية، المسؤولة عن حروق الشمس، لها أطوال موجية أقصر من الموجات البنفسجية[61].



الصورة. 5.2 - الطيف الكهرومغناطيسي و جزء الطيف المرئي[61].

تشع طاقة الشمس في جميع الاتجاهات، وعندما تنتشر تصبح أضعف. ولكن حتى بعد عبور الامتداد الكبير للفضاء الفارغ الذي يفصل الشمس عن الأرض، فإن الصفيحة المسطحة الموضوعة فوق الغلاف الجوي والموجهة عموديًا على أشعة الشمس ستتلقى الطاقة الكهرومغناطيسية للشمس بمعدل حوالي $1368W/m^2$، وهي كمية يسمى الثابت الشمسي (يتم وصف الثابت الشمسي دائمًا من حيث الواط لكل متر مربع - وليس بالوحدات الإمبراطورية أبدًا.) على الرغم من اسمه، فإن الثابت الشمسي ليس ثابتًا. المصدر الرئيسي للاختلاف في الثابت الشمسي - فهو يصل إلى حوالي 3% فقط من قيمته - ناتج عن تغيرات طفيفة في المسافة بين الأرض والشمس، ويرجع هذا الاختلاف إلى المسار الإهليجي الطفيف الذي تدور حوله الأرض حول الشمس[61].

يمثل ثابت الطاقة الشمسية "المادة الخام" التي يتعين على مهندسي الطاقة الشمسية العمل معها. تقوم الخلايا الشمسية بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، وبالتالي لا يمكن أن يكون الناتج من الخلايا الكهروضوئية أكبر من المدخلات التي تتلقاها من الشمس. لا يوجد جهاز طاقة شمسية موجود على الأرض أو في مدار حول الأرض يمكنه توفير أكثر من 1368 واط لكل متر مربع. ومع ذلك من الناحية العملية، حتى في مدار الأرض، يكون ناتج جهاز تحويل الطاقة الشمسية أقل بكثير من الثابت الشمسي، وبالنسبة للتطبيقات الأرضية، يكون ناتج كل جهاز تحويل للطاقة الشمسية، عند متوسط على مدار يوم، دائمًا صغيرًا جزء من الثابت الشمسي[61].

تحمل مجموعة الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الشمس طاقة الشمس إلى الأرض لكن أجزاء المختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي تحمل كميات مختلفة من الطاقة. تبعث الشمس الطاقة بشكل مكثف عند حوالي 470 نانومتر، والتي تقع في الجزء المرئي من الطيف. أشعة كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية عند أو بالقرب من 470 نانومتر أي في المنطقة الصفراء والخضراء من الطيف. تنخفض كمية الطاقة المنبعثة من الشمس بسرعة حيث تتباعد

الأطوال الموجية للأشعة الكهرومغناطيسية من 470 نانومتر. في الواقع من وجهة نظر الطاقة، غالبًا ما يتم تقسيم الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من الشمس إلى ثلاث فئات: الموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية الأقصر من 400 نانومتر، والموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية التي تزيد عن 400 نانومتر ولكنها أقصر من 700 نانومتر. هذا هو معظم الجزء المرئي من الطيف، والموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية الأطول من 700 نانومتر. تبعث الشمس ما يزيد قليلاً عن 40 في المائة من طاقتها عند الأطوال الموجية المرئية، والتي تشغل نطاقًا ضيقًا جدًا في الطيف الكهرومغناطيسي. تبعث الشمس حوالي 50 بالمائة من طاقتها (ولكن بكثافة أقل بكثير) عبر الجزء الواسع جدًا من الطيف الذي يتكون من أشعة كهرومغناطيسية ذات أطوال موجية أطول من 700 نانومتر. ما تبقى من الطاقة القليلة تحمله الموجات الكهرومغناطيسية ذات الأطوال الموجية الأقصر من حوالي 400 نانومتر. يتم نقل كل طاقة الشمس تقريبًا بواسطة الإشعاع الكهرومغناطيسي بأطوال موجية تتراوح بين 200 نانومتر و 4000 نانومتر. (تُكتب القيمة 4000 نانومتر عادةً في صورة أربعة ميكروميتر ويتم اختصارها 4 ميكروميتر، حيث يُعرّف الميكروميتر الواحد على أنه جزء من المليون من المتر)[61].

5. الاشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكتلة هواء 1.5:

وفق عقود عديدة من القياسات الدقيقة، وجد أن كثافة قدرة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي هي $1366W/m^2$. و على سطح الأرض، وبسبب عمليتي التشتت و الامتصاص وحتى في ظل سماء صافية على نحو تام. عندما تكون الشمس تقريبا عند نقطة السمت، ينخفض الإشعاع الشمسي بنحو 22 بالمائة. ولأن الشمس يجب أن تكون لها في المتوسط زاوية سمت مع الأفق، فإن الانخفاض ينبغي أن يبلغ في المتوسط أكثر من 22 بالمائة[60].

و لتوحيد قياس تطبيقات الطاقة الشمسية، في عام 1982 بدأت الجمعية الأمريكية للاختبار و المواد (ASTM) في نشر « الجداول القياسية للإشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكتلة هواء 1.5 ». و قد روجع المعيار في عام 2003 ليصبح ASTM G173-03. و نشر معيار منفصل لكتلة الهواء التي تساوي صفرا في عام 2006 ليصبح ASTM E490-06 و نشر ملحق خاص بزوايا الميلان المختلفة في عام 2008 ليصبح المعيار ASTM G197-08 و في معياري ASTM G173-03 و ASTM G197-08 الاحوال الجوية و المناخية لم تتغير . هذه المعايير تمثل الإشعاع الشمسي في ظل أحوال جوية معقولة خالية من السحب تكون ملائمة للمحاكاة الحاسوبية أو التقدير المقارن أو الاختبار التجريبي لنظم تنسيق النوافذ وقد عدلت المعيار الأمريكي المنظمة الدولية للمعايير (ISO) ليصبح ISO 9845 لعام 1992[60].

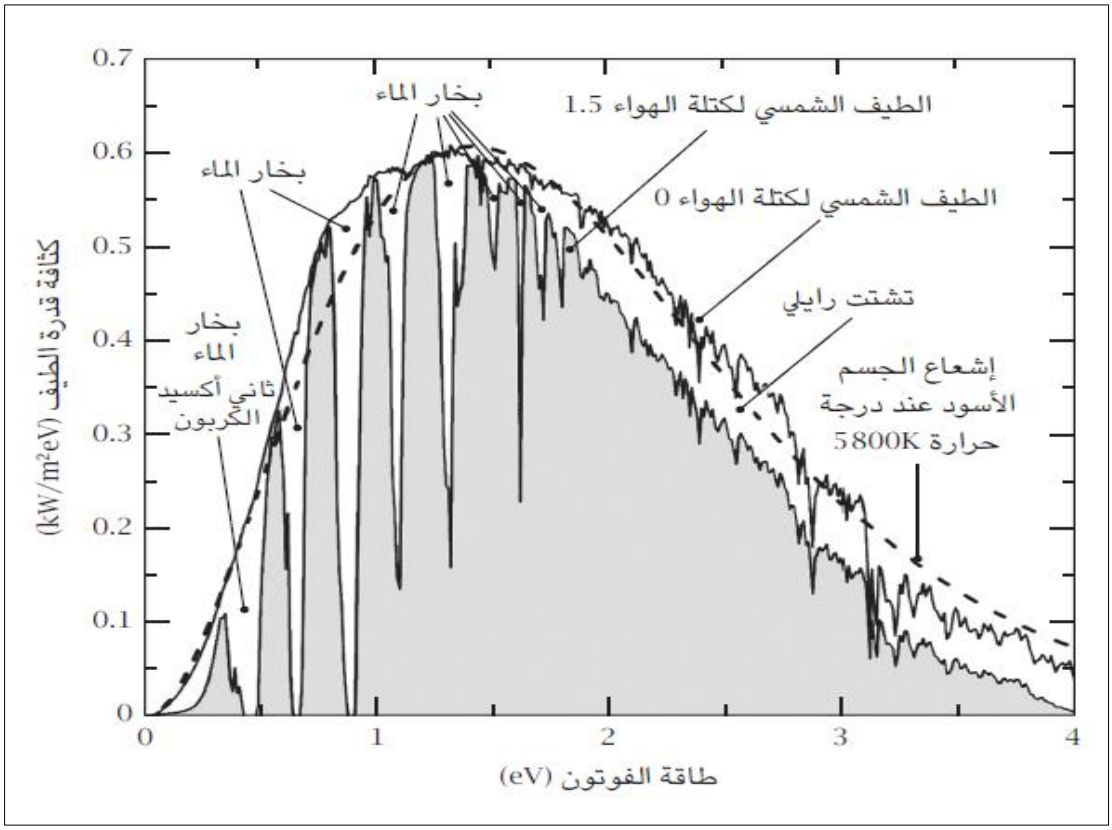
فيما يلي معنى « كتلة الهواء » عندما تكون الشمس عند نقطة السمت في ظل احوال جوية معقولة خالية من السحب ، يعرف معدل الامتصاص الخاص بالغلاف الجوي بأنه كتلة هواء تساوي 1. في أغلب الحالات، لا تكون زاوية نقطة السمت للشمس صفرا واختارت الجمعية السابقة الإشارة إليها كمعيار لها، الحالة التي يكون فيها معدل

الامتصاص 1.5 ضعف كتلة الهواء العادية التي تختصر الى كتلة الـــهواء 1.5 . تكون زاوية نقطة السمت القياسية هي[60]:

$$\theta = \cos^{-1}\frac{1}{1.5} = 48.19° \qquad (9.2)$$

كثافة القدرة المتكاملة للإشعاع الشمسي ذي كتلة الهواء 1.5 تكون $1kw/m^2$ و هذه الكمية تعرف كوحدة لقياس الإشعاع تدعى « 1 sun ».

يظهر الإشعاع الساقط الطيفي، أو طيف قدرة الإشعاع الشمسي ، الخاص بكتلة الهواء 0 و كتلة الهواء 1.5 في **الصورة. 6.2**. طيف كتلة الهواء صفر، فهو الإشعاع الشمسي الموجود خارج الغلاف الجوي . وهو تقريبا إشعاع جسم أسود عند درجة حرارة 5800K. وكثافة القدرة المتكاملة هي $1.366KW/m^2$. وطيف كتلة الهواء 1.5 يتعرض لعدد من الظواهر الجوية. على جانب الضوء الازرق، هناك انخفاض هائل في كثافة القدرة بسبب تشتت رايلي من الجزيئات و جسيمات الغبار. واحتمالية حدوث تشتت رايلي تتناسب مع معكوس الأس الرابع للطول الموجي للإشعاع ومن ثم يقل الطول الموجي القصير بشدة. وعلى جانب تحت الأحمر، يقوم بخار الماء بمعظم عملية الامتصاص ويليه أكسيد الكربون[60].



الصورة. 6.2 - طيف الاشعاع الشمسي لكتلة الهواء 0 و لكتلة الهواء 1.5[60].

6. حركة الأرض (Motion of earth):

إن حركة الأرض حول الشمس تتأثر مبدئيا بقوة التجاذب بين الأرض و الشمس وعلى الرغم من أن القمر و الكواكب يؤثران على مدار الأرض لحد ما، إلا أنه ينتج عنهما اضطراب صغير فقط و سوف نهمل الأخير و نفرض إن الأرض هي فقط جسم سماوي يدور حول الشمس، فضلا عن ذلك سنفرض أن الأرض و الشمس هي كرات صغيرة أو على الأقل تتصرف كذلك بسبب المسافة الكبيرة التي تفصل بينهما و في الحقيقة أن البعد بين الأرض و الشمس و هو أكثر من 200 مرة بقدر نصف قطر الشمس و أكثر من 20.000 مرة بقدر نصف قطر الأرض، و لأن الشمس أثقل كثيرا من الكواكب الأخرى سنفرض أن الشمس تبقى تقريبا ثابتة عند دوران الأرض حولها. باستخدام قوانين نيوتن في الحركة الكلاسيكية مع قانون نيوتن في الجاذبية، نستطيع ان نثبت ما يأتي[59]:

- ان الأرض تدور في مستوى ثابت حول الشمس.

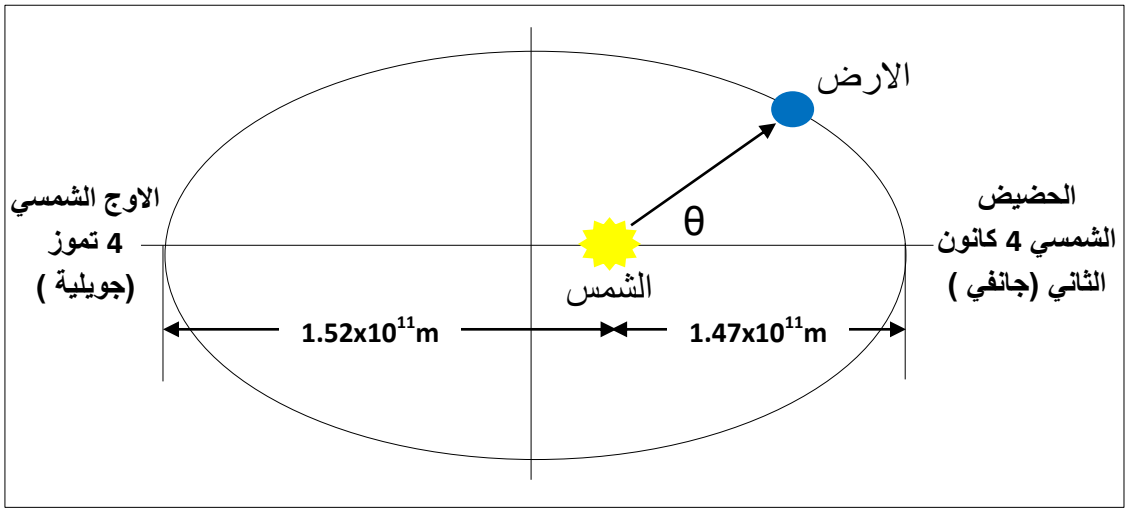
- أن مدار الأرض حول الشمس هو مدار بيضوي.

تكون الشمس موجودة في نقطة فيه تعرف بالبؤرة قانون كبلر الأول و يدعى المستوى الثابت الذي يحتوي مدار الأرض بمستوى دائرة البروج ecliptic plane، لأنه فقط عندما يمر القمر خلال هذا المستوى يمكن أن يحدث الخسوف. أن مدار الأرض على الرغم من أنه بيضوي هو قريب جدا من الدائري و تكون الشمس منحازة عن المراكز على نصف المحور الكبير عند بؤرة الشكل البيضوي. يمكن التعبير عن مدار الأرض بصورة أفضل باستخدام الإحداثيات القطبية مثل[59]:

$$r = \frac{a \times (1 - \varepsilon^2)}{1 + \varepsilon \cos\theta} \qquad (10.2)$$

حيث أن نصف المحور الكبير معدل المسافة المدارية هو ma = 1.497×10^{11}km و الاختلاف المركزي (eccentricity)هو $\varepsilon = 0.0167$ الذي يمثل مقدار الانحراف عن الشكل الدائري و يساوي صفرا بالنسبة للدائرة و يقترب من الواحد عندما يصبح الشكل البيضوي مسطحا ، إن المدار البيضوي للأرض موضح في **الصورة. 7.2** و لكن بشكل مبالغ فيه لحد ما. من المعادلة (10.2) نجد أن أصغر قيمة لـ r تدعى الحضيض الشمسي perihelion) (تحدث عندما $\theta = 0°$ و كذلك أن أكبر قيمة ل تدعى الأوج الشمس (aphelion) تحدث عندما تكون $\theta = 180°$ و تصل الأرض الحضيض الشمسي والأوج الشمسي في الرابع من كانون الثاني (جانفي) و الرابع من تموز (جويلية) على التوالي. ولهذا تكون الأرض أقرب إلى الشمس في النصف الشمالي في فصل الشتاء عنه في فصل الصيف. اي أن الأرض تكون أقرب إلى الشمس في الشتاء عنه في فصل الصيف. و على الرغم من أن الأرض تكون أقرب الى الشمس في الشتاء فإن الأجواء تكون باردة و ذلك لأن القطب الشمالي ينحرف بعيدا عن الشمس، و تسقط الأشعة الشمسية بصورة منحرفة و غير مباشرة باعثة أقل كثافة من الطاقة. تعرف الطاقة بانها مقدار الكيلو واط ـ ساعة من

الطاقة الساقطة على المتر المربع من سطح الأرض في زمن معين[59].



الصورة. 7.2 - مدار الأرض موضح فيه الاختلاف المركزي[59].

اما في شهر حزيران يونيو(جوان) فيكون القطب الشمالي للأرض مواجها للشمس، وبهذا تنطلق الأشعة الشمسية إلى الجزء الشمالي من الكرة الأرضية بصورة عمودية. وهنالك عامل اخر يجب ملاحظته و هو انه كلما قل ارتفاع الشمس في السماء- بالنسبة إلى الراصد على الأرض - فأن الإشعاع يمر بطريق أطول خلال الغلاف الجوي المحيط بالأرض، و بذلك يزداد احتمال تبعثر الإشعاع ورجوعه الى الفضاء مرة أخرى[59].

1.6 الثابت الشمسي Solar Constant:

يعرف الثابت الشمسي بأنه شدة الإشعاع الشمسي الساقطة على مستوى عمودي على اتجاه موجود خارج الغلاف الجوي للأرض و يتغير هذا الثابت بتغير الوقت من السنة بسبب تغير المسافة بين الأرض و الشمس و تسمى قيمته عندما تكون المسافة عند معدلها بالثابت الشمسي. القيمة المستعملة في معظم المصادر للثابت الشمسي هي $1367W/m^2$ و يحسب الثابت الشمسي خلال أي وقت من السنة من المعادلة الأتية[59]:

$$I_{sc} = 1367 \times \left(1 + 0.033 \times \cos\frac{360 \times ND}{365}\right) \qquad (11.2)$$

إذ أن : ND رقم اليوم من السنة.

I_{sc} شدة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي.

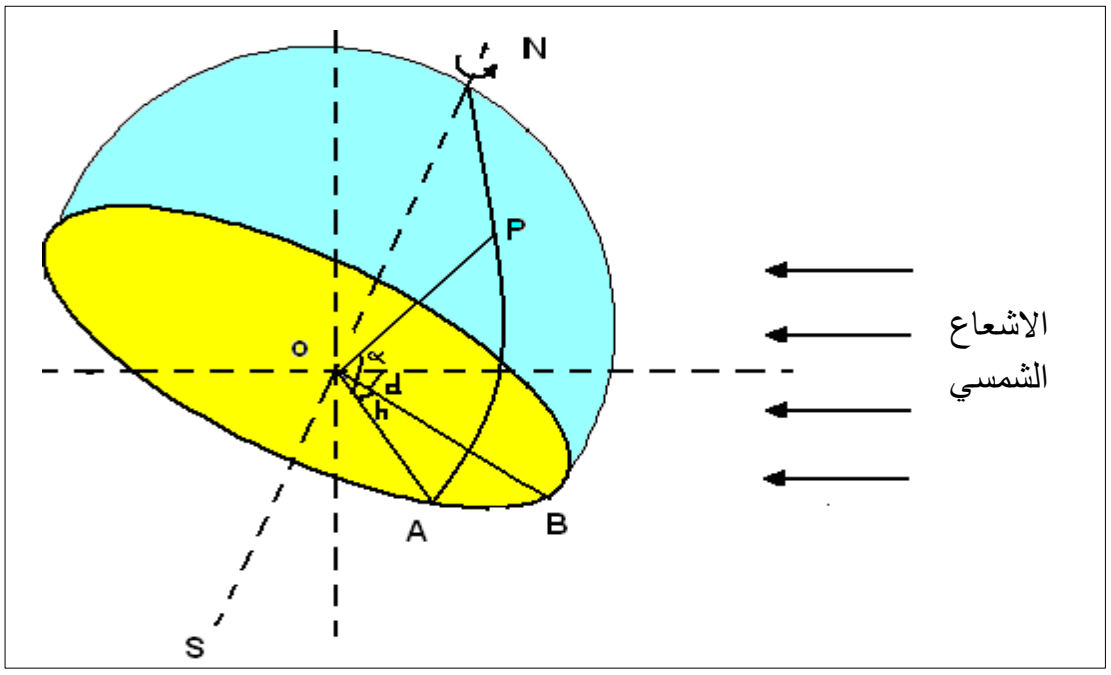
2.6 زوايا الأرض - الشمس الأساسية Sun-earth angles:

موقع أي نقطة على سطح الأرض و علاقتها بأشعة الشمس توصف في أي لحظة بواسطة زاوية خط عرض الموقع (α) و زاوية الوقت الشمسي (الزاوية الساعية (h)) و زاوية ميل الشمس (زاوية الانحراف (d)) الموضحة في

الصورة. 8.2[59].

1.2.6 زاوية خط العرض (α) Latitude angle:

هي الزاوية التي يصنعها الخط OP مع مسقطه OA في مستوى الاستواء المستوى الذي يحوي دائرة خط الاستواء ويمكن الحصول عليها من الأطلس، إذ تمثل هذه الزاوية خط العرض المار بالمنطقة المراد حساب شدة الإشعاع الشمسي فيها[59].



الصورة. 8.2 - زوايا الارض – الشمس الرئيسية[59].

2.2.6 زاوية الوقت الشمسي (h) Solar time angle:

وتسمى أيضا بالزاوية الساعية (Hour angle) وهي الزاوية المحصورة بين المسقط OA و المسقط OB (الخط الواصل بين مركز الأرض و مركز الشمس). وتكون قيمة الزاوية الساعية صفرا عند الظهر الشمسي (Solar noon) و عليه فإن OB يمثل المسقط عند الظهر للخط الواصل بين المركزين (أي خط الإشعاع الشمسي) و الزاوية الساعية هي مقياس للوقت خلال اليوم بالنسبة إلى الظهر الشمسي فساعة من الوقت تعادل 15° من الزاوية الساعية أي عندما تكون الزاوية الساعية 45° فهذا يعني أن الوقت هو الساعية الثالثة الظهر P.M، و تستخرج زاوية الوقت الشمسي من العلاقة الأتية[59]:

$$h = 15 \times [Solar.time - 12] \qquad (12.2)$$

و تأخذ الزاوية الاشارة السالبة قبل الظهر.

3.2.6 زاوية الانحراف أو زاوية ميل الشمس (d) Declination angle:

هي الزاوية بين خط المركزين ومسقطه OB و عليه تمثل الزاوية بين الأشعة الشمس و المستوى المار من الاستواء. وهي مقياس لتغير موقع الشمس بالنسبة للفصول، إذ تتغير من 23.45+ إلى 23.45- خلال السنة و يمكن أن تعد زاوية الانحراف هي الزاوية الحاصلة بين نقطة مباشرة فوق شخص ما عند خط الاستواء و موقع الشمس عند الظهر في ذلك اليوم، و يمكن حساب قيمة الزاوية بدقة من المعادلة التالية[59]:

$$d = 23.45 \times \sin\left[\frac{360}{370}(ND - 80)\right] \qquad (13.2)$$

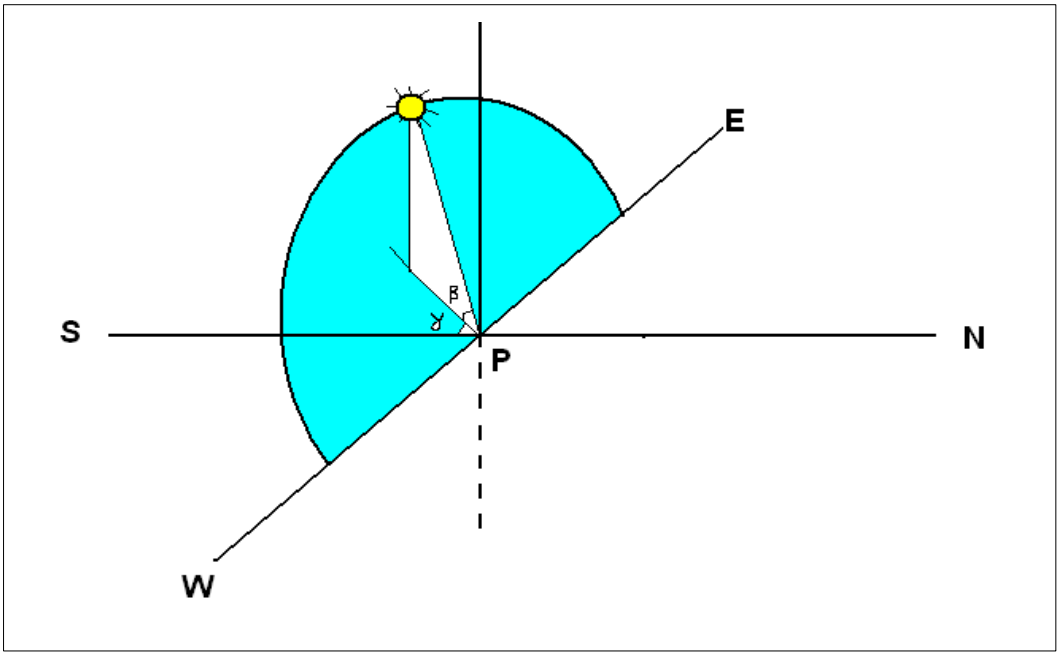
حيث يمثل ND رقم ابتداء من واحد كانون الثاني الى 365 في 31 كانون الأول.

و هناك زوايا أخرى مهمة تشتق من الزوايا الرئيسية هي :

1- زاوية ارتفاع الشمس β (Altitude angle).

2- زاوية السمت γ (Azimuth angle).

و هذه الزوايا موضحة في **الصورة. 9.2** لنقطة P على سطح الأرض.



الصورة. 9.2 - زاويتا ارتفاع الشمس و السمت للنقطة P على الارض[59].

4.2.6 زاوية الارتفاع الشمسي(β) :

تعرف أنها الزاوية في المستوى العمودي بين أشعة الشمس و مسقط تلك الأشعة على سطح الأرض، وتحصل زاوية الارتفاع الشمسي القصوى عند فترة الظهر في جميع الفصول السنة ففي فصل الشتاء عند الظهر و عند خط عرض°35 شمالا على سبيل المثال تكون زاوية الارتفاع الشمس °26.5 بينما في فصل الصيف تكون °78 وبسبب هذا الاختلاف الكبير في زوايا الارتفاع خلال السنة وفي حالة استعمال مجمع شمسي يجب أن يميل عن المستوى الأفقي خلال الموسم لكي يجمع أكبر كمية من الطاقة الشمسية[59].

إن الشمس تشرق في الشتاء عند الجنوب من الشرق وتغرب عند الجنوب من الغرب بينما تشرق الشمس من الشرق و تغرب من الغرب بالضبط مرتين فقط في السنة اذ يتساوى الليل و النهار(12 ساعة لكل منهما) إحداهما في الربيع (21 أذار) و الأخرى في الخريف(21 أيلول) و تسمى بالاعتدالين الربيعي و الخريفي. أما في الصيف فإن الشمس تشرق في الشمال من الشرق و تغرب في الشمال من الغرب ويمكن حساب زاوية ارتفاع الشمس β من المعادلة[59]:

$$\beta = \sin^{-1}(\cos(d)\cos(\alpha)\cos(h) + \sin(d)\sin(\alpha)) \qquad (14.2)$$

من المعادلة أعلاه نجد ان زاوية ارتفاع الشمس تعتمد على ثلاث زوايا أساسية هي زاوية الانحراف و الزاوية الساعية و زاوية خط العرض.

5.2.6 زاوية السمت (γ) azimuth angle:

زوايا السمت تقاس في المستوى الأفقي بين الجنوب و مسقط الخط الواصل بين مركز الشمس و نقطة معينة على الأرض (نقطة P) على المستوى الأفقي كما مبين في الصورة: 5.2. و يمكن حسابها من المعادلة[59]:

$$\tan\gamma = \frac{\sin(h)}{\sin(\alpha)\cos(h) - \cos(\alpha)\tan(d)} \qquad (15.2)$$

عندما يكون الوقت ظهرا بالتوقيت الشمسي تكون h = 0 فإن زاوية الارتفاع تكون عند قيمتها القصوى و يمكن الحصول على تعبير بسيط لزاوية الارتفاع و هو :

$$\beta_{noon} = 90 - |\alpha - d| \qquad (16.2)$$

كما يمكن حساب ساعة الشروق و الغروب من المعادلة (15.2) بتعويض قيمة β = 0 (أي أن زاوية الارتفاع صفر عند الشروق و الغروب) ومنها نحصل على :

$$h_0 = \cos^{-1}[-\tan(d)\tan(\alpha)] \qquad (17.2)$$

حيث h_0 بالدرجات و يجب أن تقسم على 15 للحصول على قيمتها بالساعات كما أن ساعة الشروق هي نفس مقدار ساعة الغروب و لكنها بالسالب، و أما طول اليوم فيحسب من المعادلة[59] :

$$2h_0 = 2\cos^{-1}[-\tan(d)\tan(\alpha)] \qquad (18.2)$$

يحسب معدل الإشعاع بدلالة الوقت الشمسي لذا يجب إيجاد علاقة بين الزمن المحلي في موقع معين و الوقت الشمسي .

3.6 الوقت الشمسي (Solar time):

يعد خط غرينتش هو خط الطـول الذي قيمته صفر، إذ يعد منتصف الليل عنده يســـاوي صفرا و منتصف النهار (أي عند الظهر) يساوي الساعة 12 أما الوقت المدني المحلي LCT و الذي يعتمد على خط الطول يكون متقدما نحو الشرق و متأخرا نحو الغرب من خط الإسناد (خط غرينتش) و الفرق هو أربع دقائق لكل خط طول واحد . يعد طول اليوم بالتوقيت المدني المحلي 24 ساعة بالضبط أما اليوم الشمسي فهو ليس 24 ساعة بالتمام، لأن محور دوران الأرض حول الشمس ليس دائريا مضبوطا و الفرق بين الوقت الشمسي المحلي و الوقت المدني المحلي يعطي معادلة الوقت (E)[59]:

$$\text{E} = \text{الوقت المدني المحلي} - \text{الوقت الشمسي الحلي} \qquad (19.2)$$

وربما اختلف الوقت الرسمي الفعلي عن الوقت المدني المحلي إذ يعتمد الأول على خط الطول لذلك البلد و هذا الوقت يسمى بالوقت المركزي القياسي أي أن:

الوقت المدني المحلي = الوقت المركزي القياسي ± 4 x (خط الطول للموقع الفعلي ـ خط الطول الذي أعتمد التوقيت على أساسه)

فمثلا خط الطول الفعلي لمدينة بغداد هو 44.14 بينما خط الطول الذي أعتمد عليه التوقيت المحلي هو 45 بالنسبة للعراق. يمكن كتابة معادلة الوقت الشمسي بالصيغة التالية[59]:

$$Solar\ time = Standard\ time + E \pm 4(La - Lc) \qquad (20.2)$$

إذ أن : E هو معادلة الوقت.

La هو دائرة خط الطول الفعلي للموقع المراد حساب الوقت عنده .

Lc هو دائرة خط الطول للبلد الذي أعتمد التوقيت المحلي على أساسه و التي هي 45° درجة شرقا بالنسبة للعراق. و تؤخذ العلاقة الموجبة عندما يكون الموقع شرقا و السالبة إذا كان الموقع غربا، فالعراق على سبيل المثال يقع في الشرق بالنسبة لخطوط الطول و عليه تؤخذ العلاقة الموجبة. أما معادلة E الوقت فتحسب بالطريقة المقترحة الأتية[59]:

$$E = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos(B) - 1.5\sin(B) \qquad (21.2)$$

إذ أن :

$$B = \frac{360(ND - 81)}{364} \qquad (22.2)$$

7. الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي :

تتغير المسافة بين الأرض و الشمس خلال السنة مما يؤدي الى تغير كمية الإشعاع الشمسي الواصل الى الأرض تبعا لذلك ويمكن حساب كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي الأرضي من المعادلة الآتية[59]:

$$I_0 = 1367\left(1 + 0.033\cos\frac{360 \times ND}{365}\right)\sin(\beta) \qquad (23.2)$$

او

$$I_0 = 1367\left(1 + 0.033\cos\frac{360\times ND}{365}\right)\times$$

$$(\cos(d)\cos(\alpha)\cos(h) + \sin(d)\sin(\alpha)) \qquad (24.2)$$

و يستلزم أحيانا حساب كمية الإشعاع الشمسي الساعي او اليومي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي، ويمكن حساب ذلك بإجراء التكامل على المعادلة (24.2) على مدى الفترة المطلوبة، و بذلك يحسب الإشعاع الساعي من المعادلة[59]:

$$H_0 = \int_{t1}^{t2} I_0 dt \qquad (25.2)$$

حيث أن t_1 و t_2 هما الوقت حسب التوقيت الشمسي عند بداية ونهاية الساعة المطلوبة حساب كمية الإشعاع الشمسي الساقط عليها و بإجراء التكامل نحصل على المعادلة الآتية :

$$H_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} \times 1367 \times \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \times ND}{365}\right) \times$$

$$\left(\cos(d)\cos(\alpha)(\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180}\sin(d)\sin(\alpha)\right) \qquad (26.2)$$

حيث ان w_2 و w_1 هما الزاوية الساعية عند بداية و نهاية الساعة المطلوبة بالدرجات .

و يمكن بنفس الطريقة حساب كمية الإشعاع اليومي D_0 لنحصل على المعادلة الآتية[59]:

$$D_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times 1367 \times \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \times ND}{365}\right) \times$$

$$\left(\cos(d)\cos(\alpha)\sin(h_0) + \frac{\pi h_0}{180}\sin(d)\sin(\alpha)\right) \qquad (27.2)$$

حيث أن h_0 هي الزاوية الساعية عند غروب الشمس بالدرجات .

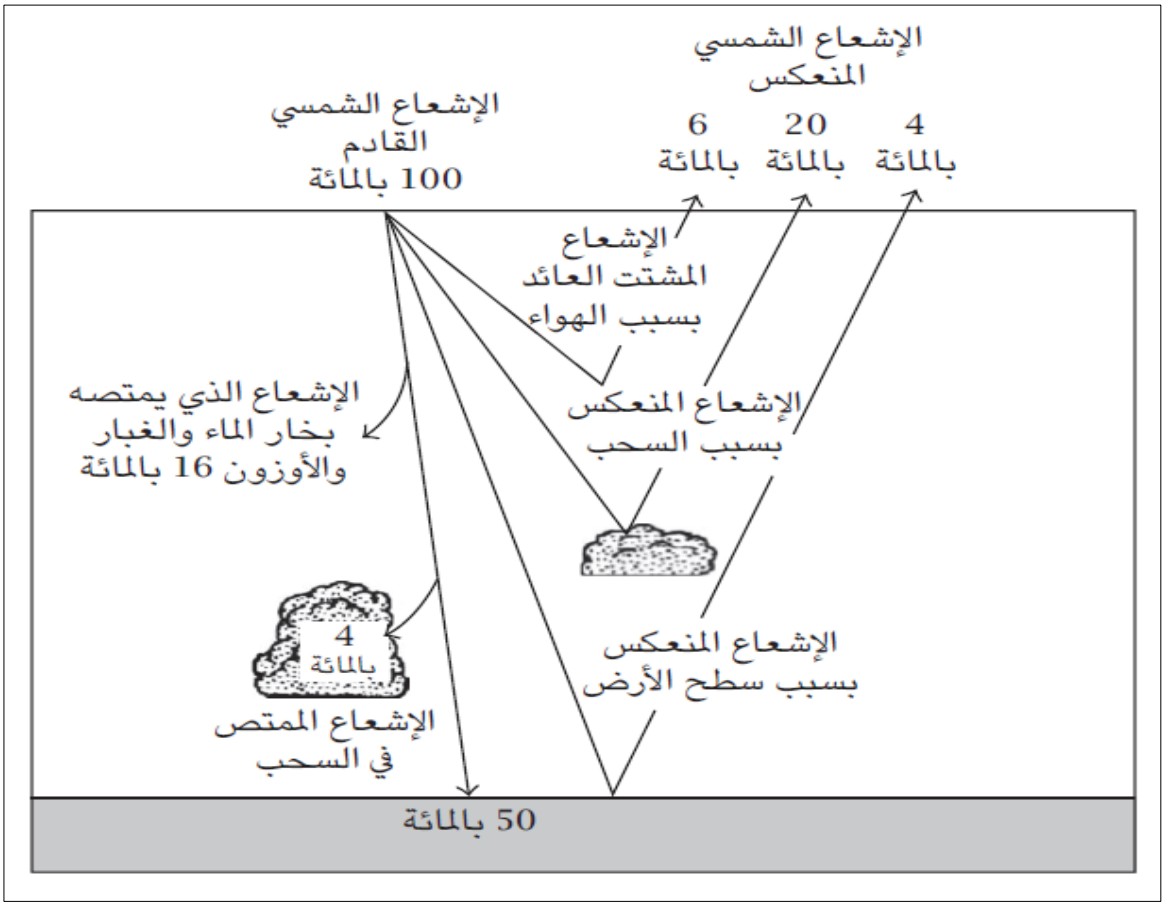
8. الأشعة الشمسية المباشرة و المنتشرة Direct and diffused radiation:

يقوم الغلاف الجوي للأرض بتصفية الإشعاع الشمسي الوارد ويغير تكوين ضوء الشمس. طبقة الأوزون على سبيل المثال منطقة من الغلاف الجوي يتراوح ارتفاعها بين ستة و 30 ميلاً (10 – 50Km)، تمنع العديد من الأشعة فوق البنفسجية من الوصول إلى سطح الأرض. (الأوزون هو جزيء يتكون من ثلاثة جزيئات أكسجين، وبينما يمكن العثور على الأوزون في الهواء بالقرب من سطح الأرض، فإنه يتركز بشكل أساسي في المنطقة التي تحمل اسمه) يتم امتصاص معظم الأشعة فوق البنفسجية ذات الأطوال الموجية الأقل من 290 نانومتر في طبقة الأوزون. وبالتالي، فإن الطاقة التي تحملها هذه الأشعة فوق البنفسجية من الشمس إلى الأرض غير متاحة للاستخدام على سطح الأرض[61].

دور الغيوم أكثر تعقيدًا. تعكس السحب المنخفضة السميكة المسماة السحب الطبقية بعض الضوء القادم إلى الفضاء. هذا الضوء المنعكس بالطبع غير متاح للاستخدام بواسطة أجهزة الطاقة الشمسية الموجودة على السطح. لكن السحب العالية الرفيعة المسماة السحب الرقيقة، تنقل معظم الضوء الوارد. تُدخل السحب عنصر العشوائية في إنتاج الطاقة الشمسية. غالبًا ما يكون من الصعب التنبؤ مسبقًا بأنواع السحب (إن وجدت) التي ستكون موجودة في موقع معين أو حتى ما إذا كانت السحب ستكون موجودة على الإطلاق. عنصر العشوائية هذا مهم لأن السحب تحط من أداء معظم أنواع أجهزة الطاقة الشمسية وتساهم فيما يسمى بتقطع الطاقة الشمسية. في الفضاء الطاقة الشمسية ليست متقطعة أبدًا. على الأرض يعتبر التقطع خاصية أساسية للطاقة الشمسية[61].

تؤدي الظواهر الأخرى أيضًا إلى تدهور الموجات الكهرومغناطيسية التي تمر عبر الغلاف الجوي. الرمل والغبار المحمول جواً، والرماد المنبعث من البراكين وحرائق الغابات، والجسيمات المنبعثة نتيجة احتراق الوقود الأحفوري، على سبيل المثال كلها تقلل من قدرة الغلاف الجوي على نقل طاقة الشمس إلى السطح. يمتص بخار الماء أيضًا بعض الطاقة ذات الطول الموجي القصير ويصدرها كطاقة ذات طول موجي أطول. قائمة الظواهر هذه طويلة، وتعتمد أهميتها النسبية في تدهور ضوء الشمس على الموقع والوقت من العام والعوامل التي يصعب أو يستحيل التنبؤ بها مسبقًا، مثل الغطاء السحابي. في ظل أفضل الظروف، يصل حوالي 50 بالمائة فقط من ضوء الشمس إلى سطح الأرض انظر **الصورة. 10.2**. هذا يصل إلى الحد الأقصى من المدخلات المتاحة لجهاز شمسي يبلغ حوالي 1000 واط لكل متر مربع[61].

لكن حالة الغلاف الجوي ما هي إلا عامل واحد في تحديد كمية الطاقة الشمسية التي يمكن تحويلها بواسطة أي جهـاز للطاقة الشمسية. مجموعة أخرى من العـوامل والتي هي هندسية بطبيعتها أكثر أهمية[61].



الصورة. 10.2 - تفاعل ضوء الشمس و الغلاف الجوي[60].

توجد العديد من النماذج لحساب كمية الإشعاع الشمسي الساقط على الأرض و من أهم هذه النماذج هي[59]:

1.8 نموذج أشري :

تحسب كمية الإشعاع المباشر الساقط على سطح عمودي على مساره I_{DN} حسب النموذج من القانون الآتي[59]:

$$I_{DN} \times exp\left(\frac{P_L}{P_0} \times \frac{B}{\sin(\beta)}\right) \qquad (28.2)$$

إذ أن : A_1 هي معامل شدة الإشعاع الشمسي و تحسب من العلاقة الآتية :

$$A_1 = 1158 \times [1 + 0.066\cos(360 \times ND/370)] \qquad (29.2)$$

B هو معامل الاضمحلال الجوي (Atmospheric extinction coefficient) و يحسب من العلاقة الأتية :

$$B = 0.175[1 - 0.2\cos(0.93 \times ND)] - 0.0045[1 - \cos(1.86 \times ND)] \qquad (30.2)$$

أما P_L/P_0 فهو النسبة بين الضغط الجوي عند الموقع المطلوب حساب شدة الإشعاع الشمسي فيه إلى الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر و يحسب من العلاقة الأتية[59]:

$$\frac{P_L}{P_0} = exp(-0.0001184 \times H_{alt}) \qquad (31.2)$$

إذ أن H_{alt} هو مقدار الارتفاع عن مستوى سطح البحر بالأمتار.

2.8 نموذج هوتيل:

يستخدم هذا النموذج لحساب الإشعاع المباشر فقط وقد اقترح هوتيل المعادلة الآتية لحساب كمية الإشعاع المباشر على سطح أفقي[59]:

$$\frac{I_b}{I_0} = a_0 + a_1 exp\left(-\frac{k}{\sin\beta}\right) \qquad (32.2)$$

حيث أن I_0 هي كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي و الأرضي و $\boldsymbol{a_0}$ و $\boldsymbol{a_1}$ و k ثوابت تعتمد على الظروف و العوامل الآتية :

أ- ارتفاع الموقع A بالكيلومتر فوق مستوى سطح البحر.

ب- صفاء الجو أو مدى الرؤية التي تعتمد على نسب بخار الماء و ثاني أوكسيد الكربون و الغبار الموجود في الجو.

ج- نوع مناخ الموقع.

9. قياس الإشعاع الشمسي :

إن معظم أجهزة قياس الطاقة الشمسية تقع ضمن أحد صنفين، الأجهزة الكهروضوئية (Photoelectric) و أجهزة التحسس الحراري للإشعاع (Bolometric). المجموعة الأولي تشمل أجهزة تحتوي على عناصر مستقبلة أو مجسات تتغير خواصها الكهربائية في حالة وجود إشعاع شمسي مثل خلايا السليكون و السيلينيوم إذ تتولد فيها فولتيه عندما يسقط الإشعاع الشمسي عليها. و على الرغم من أن الأجهزة الكهروضوئية الصلبة متينة و صغيرة ورخيصة الصنع و تتغير قليلا بظروف المحيط لكنها مع ذلك لها عيوب عديدة منها[59]:

1.أنها لا تنتج دائما إشارة خطية في مستوى الشمس و العديد منها يميل إلى الإشعاع أو التساوي عند مستويات الشدة العالية.

2. وهي الأكثر أهمية ليس للأجهزة الكهروضوئية استجابة طفيفة ثابتة على مدى الطيف الشمسي هذا يعني أن كميات متساوية من الطاقة الشمسية الواصلة في مناطق مختلفة من الطيف تنتج إشارات مختلفة خاصة إذا كان الجهاز حساسا فقط للطيف المرئي.

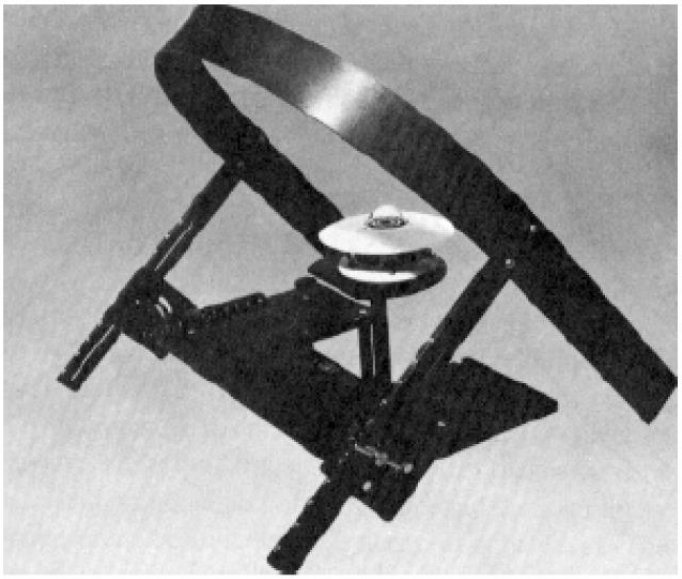
أما الصنف الثاني يشمل أجهزة التحسس الحراري للإشعاع و هذه الأجهزة عموما تمتص الإشعاع الساقط على ماص أسود و تستخدم الحرارة المتولدة لإنتاج تغير في حالة المستقبل(receiver) . يقاس هذا التغير و يعزى الى مستوى التشمس وأحد أجهزة التحسس الحراري للإشعاع النموذجية هو البايرانوميتر (Pyranometer) **الصورة. 11.2**.

الصورة. 11.2 - جهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي المباشر[59].

يتكون المستقبل من سطحين مستويين متقاربين أحدهما أسود و الأخر أبيض (أو مطلي بالفضة) مثبت لكل منهما مجس

حراري (عادة مزدوج حراري)، المجس يولد إشارة كهربائية تتناسب طرديا مع الفرق بدرجات الحرارة بين السطحين فيصبح أكثر سخونة من السطح الأبيض الذي يعكس الإشعاع فيبقى عند درجة الحرارة المحيط . وكلما كان مستوى التشمس أكبر كان الفرق بدرجات الحرارة أكبر و إشارة الفولتية أكبر. لحماية الجهاز من العوامل الجوية يغطي المستقبل عادة بقبة زجاجية شفافة للأشعة الشمسية.

وتستخدم هذا الجهاز لقياس الأشعة من القبة السماوية 180 درجة إذ يوضع على سطح مستوى و مرتفع عن سطح الأرض. ويقاس الإشعاع المباشر العمودي بجهاز يسمى بايرهليومتر و هو جهاز يشبه المنظار الفلكي (التلسكوب) يوضع على جهاز يتتبع الشمس في حركتها أثناء النهار **الصورة. 11.2** أما الإشعاع المبعثر فيقاس بنفس جهاز قياس الإشعاع الكلي بعد حجز الإشعاع المباشر عن عنصر القياس بواسطة تركيب قوس لتوليد الظل على جهاز البايرانوميتر كما في **الصورة. 12.2**[59].



الصورة. 12.2 - جهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي المنتشر[59].

10. المركزات الشمسية:

1.10 مقدمة:

بالنسبة للعديد من التطبيقات، من الضروري توفير الطاقة بكثافة عالية مقارنة بتلك المتاحة في الظروف العادية. يمكن زيادة شدة الطاقة الواردة عن طريق تقليل المساحة التي تتسبب في خسائر للإشعاع. يمكن تحقيق ذلك عن طريق ادخال جهاز بصري بين مصدر الإشعاع والسطح الذي يمتص هذه الطاقة.

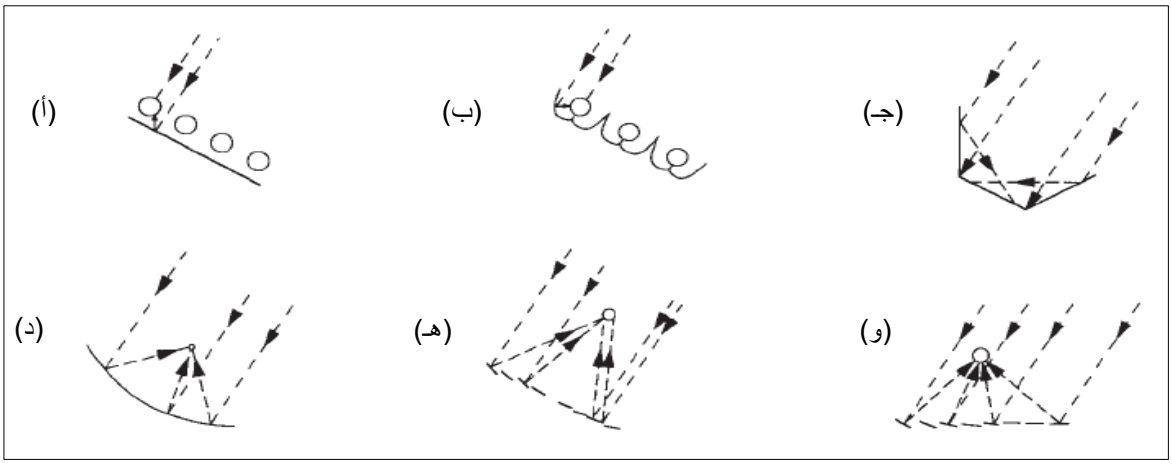
تم تنفيذ العديد من التصاميم للتركيز. يمكن أن تكون المركزات عاكسات أو منكسرات، أسطوانية أو ذات أسطح دورانية، متصلة أو مجزأة. يمكن أن تكون أجهزة الاستقبال محدبة أو مسطحة أو مقعرة ويمكن أن تكون مطلية أو غير

مطلية. العديد من أوضاع تتبع الطاقة الشمسية ممكنة أيضًا. يمكن أن يختلف معدل التركيز (النسبة بين مساحة فتحة المجمع ومساحة منطقة الامتصاص) بعدة رتب من القيمة. مع هذا النطاق الواسع، من الصعب تطوير تحليلات عامة تنطبق على جميع المركزات. وهكذا يتم التعامل مع المركزات في مجموعتين: مركّزات غير تصويرية ذات نسبة تركيز منخفضة ومركزات تصويرية خطية بنسبة تركيز متوسطة. نلاحظ أيضًا بعض الاعتبارات الأساسية للمركزات ثلاثية الأبعاد التي يمكن أن تعمل بمستوى عالٍ من معدل التركيز.

يمكن أن يكون للمركزات معدلات تركيز من قيم منخفضة، وأقل من وحدة، وقيم عالية في حدود 105. زيادة معدلات التركيز تعني زيادة درجات الحرارة التي يمكن عندها توفير الطاقة[62].

2.10 تصاميم المركزات:

العديد من تصاميم المركزات ممكنة لزيادة تدفق الإشعاع إلى المستقبل. يمكن أن تكون المركزات عاكسات أو منكسرات. يمكن أن تكون أسطوانية للتركيز في "خط" أو دائرية للتركيز في "نقطة". يمكن أن تكون أجهزة الاستقبال مقعرة أو مسطحة أو محدبة. يظهر مثال على ستة تصاميم في **الصورة. 13.2**.



الصورة. 13.2 - التصاميم الممكنة للمركزات: (أ) ممتصات أنبوبية ذات عاكس خلفي مشتت، (ب) ممتصات أنبوبية ذات عواكس طرفية مرآوية، (جـ) مستقبل مستوي مع عاكسات مستوية، (د) مكثف مكافئ، (هـ) عاكس فريسنل، (و) مجموعة من منظومات تتبع الشمسية مع جهاز استقبال مركزي [62].

التصميمان الأولان (أ و ب) عبارة عن تصفيفات من الأنابيب المفرغة مع ماصات أسطوانية متباعدة، مع عاكسات خلفية لتوجيه الإشعاع في المنطقة بين الأنابيب نحو الماصات. الأول يستخدم عاكسًا مسطحًا والثاني عاكسًا عبارة عن مرايا على شكل أعتاب.

يحتوي التصميم الموضح في الصورة (ج) على مستقبل مسطح مع عاكسات مسطحة على الحواف لعكس إشعاع إضافي على جهاز الاستقبال. نسب التركيز لهذا النوع من المجمعات منخفضة، مع قيمة قصوى أقل من 4. يمتص المستقبل جزءًا من المركبة المنتشر للإشعاع الساقط الواقع على العاكسات. يمكن اعتبار هذه المجمعات مجمعات مسطحة ذات إشعاع متزايد. توضح الصـــورة (د) عاكسًا على شكل قطـــع مكافئ، والـــذي يمكن أن يكون لـــه سطح

أسطواني (مع مستقبل أنبوبي) أو سطح دوراني (مع مستقبل كروي أو نصف كروي) [62].

يمكن استبدال العاكس المكافئ المستمر بعاكس فرينل أو بمجموعة من العاكسات المسطحة المركبة على مجموعة متحركة كما هو موضح في الصورة (هـ). يمكن أيضًا تثبيت جوانب العاكس بشكل فردي وتعديلها في الموضع كما هو موضح في الصورة (و). تعتبر المصفوفات الكبيرة لمنظومات التتبع من هذا النوع، مع مستقبلات مثبتة على برج ، أساس تصميمات مجمعات "المستقبلات المركزية".

بالنسبة للمركزات الموضحة في الصورتين (ج و و)، يمكن استخدام مستقبلات مسطحة من جانب واحد (إذا لم يكن المستقبل داخل العاكس). من الممكن أيضًا استخدام أشكال إسطوانية أو نصف كروية أو غيرها من الأشكال المحدبة بالإضافة إلى التجاويف المستقبلة.

بشكل عام، المركزات التي تحتوي على مستقبلات أصغر بكثير من الفتحة (الفتحة المستوية للمركز التي يمر من خلالها الإشعاع الشمسي) تكون فعالة فقط للإشعاع المباشر. من الواضح أيضًا أن زاوية حدوث الإشعاع المباشر للحزمة على المركز مهمة وأن تتبع الشمس ضروري لهذه المجمعات. تم تصميم عدة أنواع من آليات التوجيه لتحويل تركيز المجمعات بحيث ينعكس الإشعاع الساقط من الحزمة دائمًا إلى المستقبل.

تركز الأنظمة البصرية الخطية (الأسطوانية) على الإشعاع الشمسي على جهاز الاستقبال إذا كانت الشمس في المستوى المركزي للمُركّز (المستوى الذي يحتوي على المحور البؤري والخط الرأسي للعاكس). يمكن أن تدور هذه المجمعات حول محور دوران واحد، والذي قد يكون المحور الشمالي الجنوبي أو المحور الشرقي الغربي أو المحور المائل وموازيًا لمحور الأرض (في هذه الحالة يكون معدل الدوران 15 درجة / ساعة). توجد فروق ذات دلالة إحصائية في كل من كمية الإشعاع الساقط واعتماده على الوقت وجودة الصورة التي تم الحصول عليها باستخدام أوضاع التوجيه الثلاثة هذه [62].

العاكسات التي لها أسطح دورانية (مركزات دائرية) موجهة بصريًا بحيث يكون محورها متماشياً مع الشمس وبالتالي يجب أن تكون قادرة على الدوران في محورين. يمكن أن يكون أحدهما أفقيًا والآخر رأسيًا، أو يمكن إمالة أحدهما بحيث يكون موازٍ لمحور دوران الأرض (أي المحور القطبي) والآخر عموديًا عليها.

يمكن أن توفر أنظمة التوجيه تعديلات مستمرة أو شبه مستمرة، مع حركة المركز للتعويض عن التغيير في موضع الشمس. بالنسبة للمركزات الخطية ذات التركيز المنخفض، من الممكن تعديل التغييرات المحتملة لمواضعهم بشكل متقطع أو أسبوعي أو شهري أو موسمي. يمكن أن تعتمد أنظمة التوجيه المستمر على التشغيل اليدوي أو الميكانيكي. تعتمد الأنظمة اليدوية على ملاحظات المشغلين ومهاراتهم لإجراء التصحيحات اللازمة. قد يكون هذا مناسبًا لبعض الاستخدامات إذا لم تكن مستويات التركيز عالية جدًا.

يمكن أن تكون أنظمة التوجيه الميكانيكية أنظمة تتبع الشمس أو أنظمة مبرمجة. تستخدم أنظمة تتبع الشمس أجهزة الكشف لتحديد عدم محاذاة النظام ومن خلال أدوات التحكم، يتم بإجراء التصحيحات اللازمة لإعادة ترتيب النظام. تتسبب الأنظمة القابلة للبرمجة في أن يتحرك المجمع بطريقة محددة مسبقًا (على سبيل المثال حوالي 15 درجة / ساعة حول المحور القطبي) وتتطلب فقط فحوصات عرضية لضمان المحاذاة. قد يكون من المفيد أيضًا استخدام مجموعة من طرق التتبع هذه، على سبيل المثال عن طريق تركيب تصحيحات صغيرة بواسطة آلية تتبع الشمس على نظام "تحديد المواقع على وجه التقريب" القابل للبرمجة. يجب أن يكون أي نظام ميكانيكي قادرًا على ضبط موضع المركز من موضع نهاية اليوم إلى موضع بداية العملية في اليوم التالي [62].

3.10 تصنيف المركزات الضوئية:

هناك مجموعة متنوعة من تصاميم المركزات. يتم تصنيفها إلى فئتين بصريتين رئيسيتين:

المركزات الضوئية التصويرية.

المركزات الضوئية غير التصويرية.

في المركزات الضوئية التصويرية، نهتم بالصورة التي شكلها المركز البصري على المستقبل، بحيث يجب أن يكون المستقبِل صغيراً بما يكفي لتحقيق تجانس معين في توزيع الصورة المتكونة (التركيز). وبالتالي تتمتع المركزات الضوئية للتصوير بميزة أنها تتمتع بمعدل تركيز عالٍ. من ناحية أخرى في البصريات غير التصويرية لا نهتم بتكوين الصورة، وبالتالي يمكن أن يكون المستقبِل كبيرًا مع تجانس الإشعاع على المستقبل ولكن معدل التركيز في هذا النوع من المركزات أقل من تركيز المركزات البصري التصويرية.

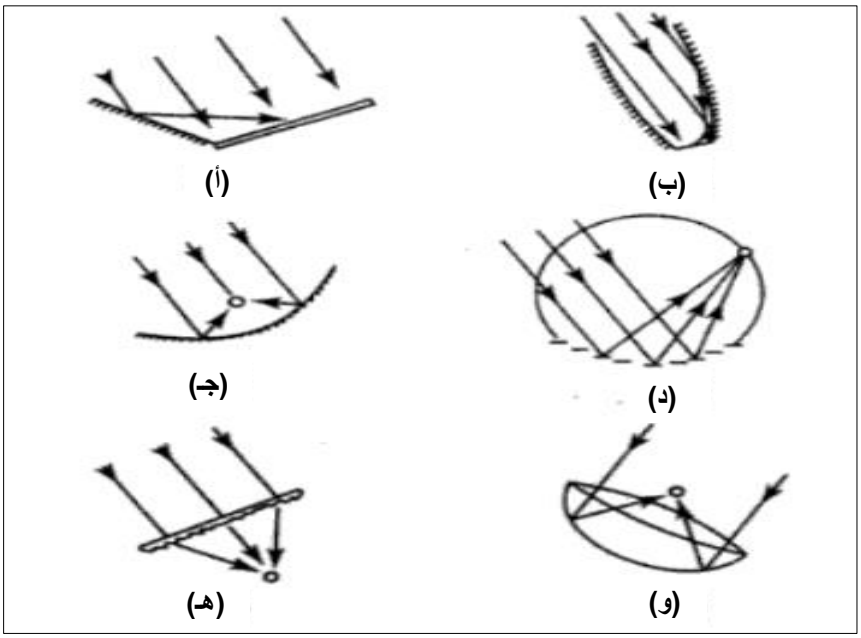
4.10 أنواع المركزات الضوئية:

تتيح العديد من أنواع المركزات الضوئية زيادة تدفق الإشعاع إلى المستقبلات. بالنسبة لنوع المركزات التصويرية، يمكن أن تكون "أسطوانية" للتركيز في "خط" أو دائرية للتركيز عند "نقطة"، بينما بالنسبة لغير التصويرية، قد تكون مجوفة في الشكل لامتصاص طويل أو في شكل مخروطي لامتصاص دائري. من بين هذه الأنواع من المركزات نجد:

- المركز المسطح. / - المركز المجوف على شكل حرف V.
- المركز المكافئ الأسطواني. /- المركز المكافئ مركب.
- مركز مع مستقبل مركزي. /- مركز عدسة فرينل.
- مركز مخروطي. / - المركز المكافئ.
- م المركز المركب بيضاوي الشكل. / - المركز الهبربلودال.

- المركز الهرمي.

الصورة. 14.2 توضح بعض أنواع المركزات.



الصورة. 14.2 - انواع المركزات الضوئية (أ) مركز مسطح مع عاكسات مسطحة من جانب واحد (ب) مركز مكافئ مركب (جـ) المركز الأسطواني المكافئ (د) المركزات الثابتة الموضوعة بشكل دائري مع جهاز استقبال متنقل (هـ) عدسة فرينل (و) مركز مكافئ دورانى [63].

5.10 تعريفات:

لكي نكون متسقين في استخدام المصطلحات، سنستخدم مصطلح "جامع التركيز" للإشارة إلى نظام التركيز بأكمله. سيُستخدم مصطلح "المُركز" فقط للنظام الفرعي البصري الذي يوجه الإشعاع الشمسي نحو المستقبل، بينما يُستخدم مصطلح "الماص" عادةً للدلالة على النظام الفرعي الذي يشكل المستقبل.

سنقوم الآن بتعريف بعض المصطلحات: الفتحة ومعدل التركيز وزاوية القبول وعامل الاعتراض ومعدل زاوية الورود. المصطلحات الثلاثة الأولى شائعة في الفئتين الرئيسيتين للمركزات (التصويرية أو غير التصويرية)، بينما يتعلق المصطلحان الأخيران بالمركزات البصرية التصويرية فقط [63].

1.5.10 الفتحة (W):

إنها الفتحة المستوية للمركز التي يمر من خلالها الإشعاع الشمسي. بالنسبة للمركز الأسطواني أو الخطي فإنه يتميز بعرضه، بينما بالنسبة للسطح الدائري يتميز بقطر الفتحة.

2.5.10 معدل التركيز (C):

هناك نوعان من تعريفات معدل التركيز التي يتم استخدامها لتجنب الالتباس، يجب إضافة رمز عندما يكون

السياق لا يشير بوضوح للتعريف المتعلق به الامر. التعريف الأول هندسي بحت ويسمى "معدل التركيز الهندسي" أو "معدل تركيز السطح"، بينما الثاني بدلالة نسبة الكثافة المقاسة ويسمى "معدل تركيز الكثافة" أو "معدل تركيز التدفق".

3.5.10 معدل تركيز السطح (C_{area}):

إنها نسبة المساحة الفعالة للفتحة إلى منطقة الممتص.

$$C_{area} = A_a/A_r \qquad (33.2)$$

حيث Aa هي مساحة فتحة المركز و A_r هي مساحة المستقبل (الماص).

4.5.10 معدل تركيز التدفق الضوئي (C_{flux}):

إنها نسبة شدة الضوء عند الفتحة إلى الشدة عند الممتص.

$$C_{flux} = I_a/I_r \qquad (34.2)$$

حيث I_a هي قيمة التدفق الضوئي عند فتح المركز و I_r هي قيمة التدفق الضوئي عند مستوى فتح جهاز الاستقبال (الممتص). تختلف قيم معدل التركيز من الوحدة (وهي الحالة الحدودية لمركز مسطح) إلى بضعة آلاف لمركز القطع المكافئ.

5.5.10 زاوية القبول ($2\theta_a$):

هذه هي الزاوية التي يمكن أن ينحرف فيها إشعاع الحزمة عن الناظم عن الفتحة المستوية وتصل إلى الممتص دون إزاحة كلية أو جزئية للمركز.

تتطلب البصريات الهندسية والقانون الثاني للديناميكا الحرارية أن يكون أقصى تركيز ممكن لنصف زاوية القبول لمركز معين هو للمكثفات المجوفة ثنائية الأبعاد:

$$C_{idéal,2D} = 1/\sin\theta_a \qquad (35.2)$$

وللمكثفات ثلاثية الأبعاد (المخاريط ، القطع المكافئ ، الأهرامات):

$$C_{idéal,3D} = 1/sin^2\theta_a \qquad (36.2)$$

لا تحتاج المركزات ذات زوايا القبول الكبيرة إلا إلى تعديلات عرضية، بينما تحتاج المركزات التي لديها زوايا قبول

صغيرة إلى التعديل باستمرار.

6.5.10 عامل الاعتراض (γ):

إنه جزء من الإشعاع المنعكس الذي يقع على السطح الماص لجهاز الاستقبال.

7.5.10 معدل زاوية السقوط (K):

هذه هي أخطاء محيط المركز وأخطاء التتبع وأخطاء إزاحة المستقبل من البؤرة والتي يمكن أن تؤدي إلى توسيع أو إزاحة الصورة وبالتالي التأثير على نفاذية النظام وامتصاص المستقبل.

يتم تقليل التركيز في الأنظمة العملية بعدة عوامل [64]:

- تعتمد معظم المركزات التقليدية وخاصة القطوع المكافئة أو العدسات المركزة، على التصميمات البصرية التي تقل عن الحدود الديناميكية الحرارية بمعامل 2 إلى 4.

تتطلب أخطاء التتبع والأخطاء عند محيط المركز المحور ومحاذاة المستقبل تصميم زاوية قبول أوسع بكثير من العرض الزاوي للشمس.

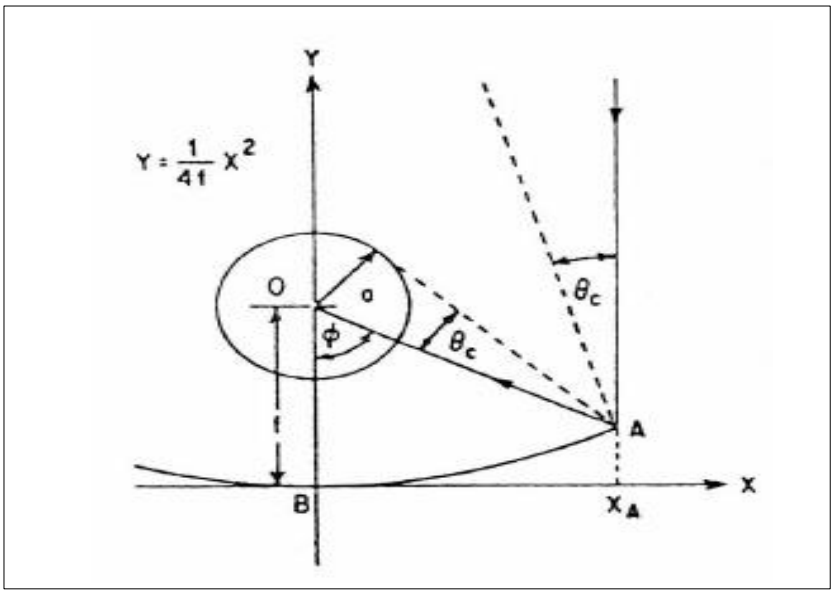
- لا توجد عدسة أو مادة مركزة هي عاكس مراوي تمامًا وبالتالي يجب توسيع زاوية القبول بشكل أكبر، ويتم حساب متوسط التأثير غير المراوي بواسطة الأوساخ والغبار.

- بسبب تشتت الغلاف الجوي، يمكن أن يأتي جزء كبير من الإشعاع الشمسي من اتجاهات أخرى غير اتجاه الشمس نفسها.

تتضمن نسبة التركيز في المكثف الشمسي حلاً وسطًا بين الأداء البصري والحراري. يجب اختيار جهاز الامتصاص ليكون صغيرًا بقدر الإمكان لتقليل فقد الحرارة، ولكنه كبير بما يكفي لاعتراض كل أو اغلب الإشعاع الساقط. لذلك يجب أن ننظر في الأشعة بأكبر انحراف يمكن توقعه θ_c عن اتجاه التصميم، أي اتجاه فتح المجمع في مركز الشمس.

الانحراف الزاوي θ_c يرجع إلى الحجم المحدود للشمس والمرآة وتتبع الأخطاء. يوضح مثال العاكس المكافئ مع أنبوب أسطواني كممتص **الصورة. 15.2** تعريف θ_c. يتم وضع الأنبوب الماص بشكل مركز حول الخط البؤري. إذا وصل نصف القطر مع أكبر انحراف إلى جهاز الامتصاص، كما هو موضح في الخط المنقط في **الصورة. 15.2**، يجب أن تكون نسبة التركيز:

$$C_{2D,parabolique,cylindrique,absorbeur} = \frac{2x_A}{2\pi a} = \frac{\sin \emptyset}{\pi \sin \theta_c} = \frac{\sin \emptyset}{\pi} C_{idéal} \qquad (37.2)$$



الصورة. 15.2 - البعد البؤري f (OB) و نصف زاوية القبول θ_c لمركز القطع المكافئ[64].

حي ϕ هي زاوية فتح الحافة (∠ AOB). الحد الأقصى يحدث عند $\phi = 90$ درجة وينخفض بمعامل π من الحد المثالي. هذا نموذجي لجميع المكثفات أحادية الطبقة، أي أنها تصل فقط إلى 4/1 إلى 2/1 من حد التركيز الديناميكي الحراري. بالنسبة للتركيبات العملية، فإن التركيز الهندسي ليس معيار التصميم الوحيد، وسيتم استخدام زوايا حواف مختلفة قليلاً. على سبيل المثال، يمكن استخدام زوايا الحواف التي تزيد عن 90 درجة و يمكن استخدام ماصات صغيرة. [64].

ومع ذلك هناك فئة من المكثفات غير التصويرية، والتي وصلت إلى الحد الديناميكي الحراري للتركيز. بالإضافة إلى ذلك يمكن أن يقترب جدا نظام تركيز تقليدي مع CPC كمركز ثانوي من الحد الديناميكي الحراري. يتضمن اختيار التركيز الأمثل لتطبيق معين تقييم العديد من العوامل البصرية والمناخية والحرارية والاقتصادية الأخرى إلخ. ومن غير المحتمل أن يكون نوع واحد من المركزات هو الأفضل لجميع التطبيقات. لذلك من المناسب تحليل عدة أنواع من المكثفات الشمسية [65].

معدل التركيز السطحي له حد أعلى يعتمد على التركيز سواء كان المكثف ثلاثي الأبعاد (دائري) مثل المكثف المكافئ أو ثنائي الأبعاد (خطي) مثل المكثف الأسطواني - مكافئ. يعتمد تطوير الحد الأقصى لمعدل التركيز [66] على المبدأ الثاني للديناميكا الحرارية المطبق على التبادل الحراري الإشعاعي بين الشمس والمستقبل.

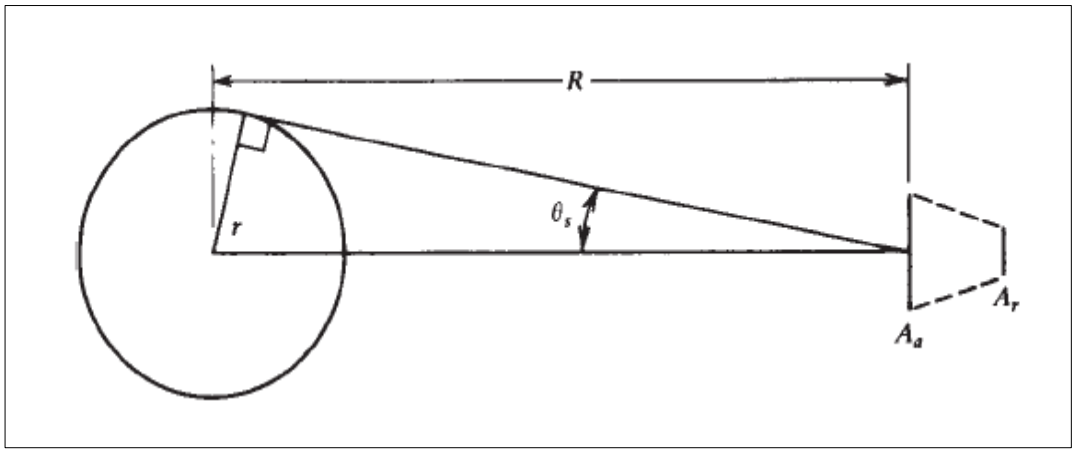
معدل التركيز السطحي له حد أعلى يعتمد على التركيز، سواء كان المكثف ثلاثي الأبعاد (دائري) مثل المكثف المكافئ أو ثنائي الأبعاد (خطي) مثل المكثف الأسطواني- مكافئ.

يعتمد تطوير الحد الأقصى لمعدل التركيز [66] على المبدأ الثاني للديناميكا الحرارية المطبق على التبادل الحراري الإشعاعي بين الشمس والمستقبل.

ضع في اعتبارك مركزًا دائريًا بفتحة سطحية A_a وجهاز استقبال سطحي A_r يقابل الشمس بشعاع على المسافة R، كما هو موضح في **الصورة. 16.2**.

نصف الزاوية التي تقابلها الشمس هي θ_s. إذا كان المكثف مثاليًا، فإن الإشعاع الصادر من الشمس عند الفتحة (وبالتالي على المستقبل أيضًا) هو جزء من الإشعاع المنبعث من الشمس والذي يتم اعتراضه من خلال الفتحة. على الرغم من أن الشمس ليست جسمًا أسود، ولكن للتحليل التقريبي، يمكن افتراض أنها جسم أسود عند T_s (درجة حرارة السماء):

$$Q_{s\to r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^2 \qquad (38.2)$$



الصورة. 16.2 - رسم تخطيطي للشمس عند T_s على مسافة R من مكثف بفتحة A_a ومنطقة استقبال A_r [62].

يشع جهاز استقبال مثالي (أي جسم أسود) طاقة تساوي $A_r\ T_r\ 4$ وجزء صغير من هذه الطاقة، E_{r-s} (عامل التبادل الانعكاسي)، يصل إلى الشمس:

$$Q_{r\to s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r\to s} \qquad (39.2)$$

عندما تكون T_r و T_s هي نفسها، فإن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يعني أن $Q_{s\to r}$ تساوي $Q_{r\to s}$. إذن من المعادلتين (38.2) و (39.2):

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r\to s} \qquad (40.2)$$

وبما أن القيمة القصوى لـ $E_{r\to s}$ هي الوحدة، فإن أقصى نسبة تركيز للمكثفات الدائرية هي:

$$\left[\frac{A_a}{A_r}\right]_{Circulaire,\ max} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{sin^2\theta_s} \qquad (41.2)$$

تطور مماثل للمركزات الخطية يؤدي إلى:

$$\left[\frac{A_a}{A_r}\right]_{Linéaire,\ max} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin\theta_s} \qquad (42.2)$$

وهكذا مع $\theta_s = 0.27$ درجة يكون الحد الأقصى لنسبة التركيز الممكنة للمركزات الدائرية 45000 وللمركزات الخطية يكون الحد الأقصى 212 [62].

كلما زادت درجة الحرارة التي يجب توفير الطاقة عندها، يجب أن يكون معدل التركيز أعلى ويجب أن تكون دقة بصريات المركز وتوجيه النظام أعلى. كما ذكرنا سابقًا، يمكن تقسيم المركزات إلى فئتين: غير التصوير والتصوير. المركزات غير التصويرية كما يوحي الاسم ، لا تنتج صورًا محددة بوضوح للشمس على الماص، بل توزع الإشعاع القادم من جميع اتجاهات القرص الشمسي على كامل سطح جهاز الامتصاص. تكون نسب التركيز للمجمعات الخطية غير التصويرية في النطاق المنخفض وهي عمومًا أقل من 10. من ناحية أخرى تشكل مركزات التصوير صورًا محددة جيدًا على جهاز الامتصاص [62].

6.10 طرق تصنيف المركزات:

جامعات التركيز من أنواع مختلفة ويمكن تصنيفها بعدة طرق. يمكن أن تكون من النوع العاكس باستخدام المرايا أو من النوع الانكساري باستخدام عدسات فرينل. يمكن أن تكون الأسطح العاكسة المستخدمة قطع مكافئ أو كروي أو مسطح. يمكن أن تكون مستمرة أو مجزأة. يمكن أن يكون التصنيف أيضًا من وجهة نظر تكوين الصورة، حيث يكون المركز إما تصويري أو غير تصويري. بالإضافة إلى ذلك يمكن للمركز التصوير التركيز على خط أو إلى نقطة [63].

يستخدم معدل التركيز أيضًا كمعامل لتصنيف مجمعات التركيز. نظرًا لأن هذه النسبة تحدد درجة حـرارة التشغيل تقريبًا، فإن طريقة التصنيف هـذه تعادل تصنيف المجمعات من خلال نطاق درجة حرارة التشغيل. الاحتمال الأخير هو وصف جامعي التركيز بنوع التتبع المعتمد. اعتمادًا على زاوية القبول، قد يكون التتبع متقطعًا (تعديل واحد

يوميًا أو كل بضعة أيام) أو مستمرًا. بالإضافة إلى ذلك يمكن أن يكون التتبع على طول محور واحد أو محورين. يوضح الجدول (1.2) بعض التطبيقات لأنواع مختلفة من المركزات [64].

الجدول. 1.2 - ملخص تطبيقات انواع مختلفة من المركزات[64].

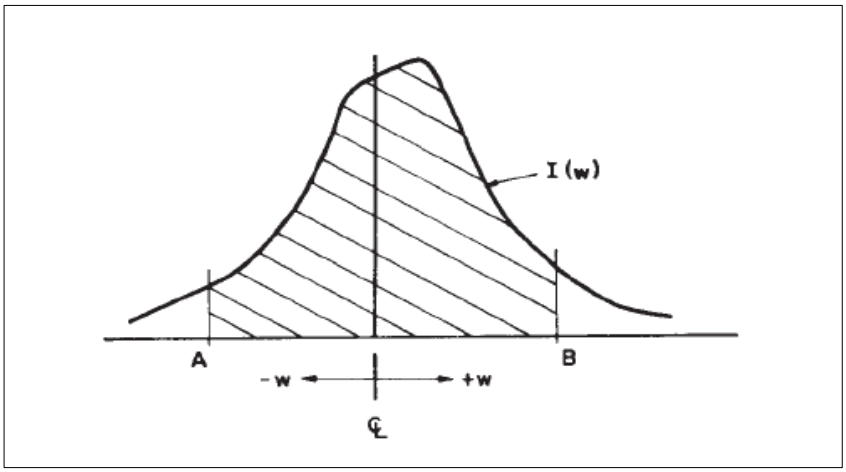
نمط التتبع	نوع المركز	الرتبة التقريبية لمعدل التركيز	درجة حرارة التشغيل القصوى التقريبية
لا شيء (إمالة ثابتة)	CPC	1.5 إلى 2	تصل إلى 100°C بدون فراغ
			حتى 150°C تحت التفريغ
لا شيء (تعديلان للإمالة في السنة)	V- مجوف	1.5 إلى 2	حتى 150°C مئوية تحت التفريغ
	CPC	3	حتى 180°C مئوية تحت التفريغ
لا شيء (تعديل موسمي ، يومي)	V- مجوف	2 إلى 3	حتى 180°C تحت التفريغ
	CPC	3 إلى 10	من 100°C إلى 150°C بدون فراغ
			150°C إلى 250°C تحت التفريغ
التتبع على طول المحور	عدسة فرينل	6 إلى 30	من 100°C إلى 200°C
	طبق مجوف	من 15 إلى 50	200°C إلى 300°C مع مُكثّف ثانوي، تحت التفريغ، وامتصاص انتقائي، حتى 400° ، يمكن أن يكون 500°
	مرآة فرينل		
	مرآة استقبال فرينل متحركة		
تتبع على محورين	عاكس كروي ثابت بالإضافة إلى مستقبل مع متتبع	من 50 إلى 150	300°C إلى 500°C
	عدسة فرينل	100 إلى 1000	300°C إلى 1000°C
	طبق، برج الطاقة	من 500 إلى 3000	من 500°C إلى 2000°C

1.6.10 عامل الاعتراض:

يُعرَّف عامل الاعتراض γ بأنه جزء الإشعاع المنعكس بواسطة المركز والذي يقع على سطح الامتصاص للمستقبل. هذا المفهوم مفيد بشكل خاص لوصف المركزات التصويرية [66]. يظهر مثال لصورة تم تكوينها في المستوى البؤري للمركز الخطي في **الصورة. 17.2**، إذا امتد المستقبِل من A إلى B، يكون عامل التداخل هو:

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(y)dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(y)dy} \qquad (43.2)$$

الهدف من استخدام أنظمة التركيز هو تقليل فقد الحرارة من جهاز الامتصاص عن طريق تقليل مساحة سطحه. يتم إنشاء معظم المركزات التصويرية بمستقبلات كبيرة بما يكفي لاعتراض جزء كبير من الإشعاع المنعكس ولكنها ليست كبيرة بما يكفي لاعتراض الحواف منخفضة الكثافة للصور. قيم γ الأكبر من 0.9 هي قيم مشتركة [62].



الصورة. 17.2 - مثال على توزيع التدفق في المستوى البؤري لمركز تصوير خطي. يمتد جهاز الاستقبال من A إلى B [62].

2.6.10 معدلات زاوية السقوط:

من الناحية العملية ، لا تحتوي الصور غالبًا على حدود محددة جيدًا، ومن الأفضل عمومًا استخدام جهاز استقبال يعترض أقل من اجمالي الأشعة المنعكسة. من الضروري إيجاد حل وسط بين الزيادة في الخسائر الحرارية مع زيادة سطح الاستقبال وزيادة الخسائر البصرية مع انخفاض سطح الاستقبال لتحسين أداء المركزات.

تمت دراسة مشكلة التحسين هذه، بحيث يعترض المستقبل ذو الحجم الأمثل في نطاق واسع من الظروف ما بين 90% إلى 95% من الإشعاع [67، 68].

وبالتالي فإن الفقد البصري، غالبًا ما بين 5% و 10%، غير مرغوب فيه في هذا النوع من المركزات. تم التعبير عن هذا كدالة لعامل الاعتراض، وهو جزء من الإشعاع المنعكس الذي يعترضه المستقبل.

تؤدي الأخطاء في حواف المركزات وأخطاء التتبع وأخطاء إزاحة مستقبل التركيز البؤري إلى صور منحرفة، وبالتالي تؤثر على γ.

يمكن أن تؤثر هذه الأخطاء بكيفية متساوية أيضًا على نفاذية النظام المطلي وامتصاص المستقبل. بالإضافة إلى ذلك فإن انتشار الصورة على مستوى مستقبل المركز الخطي يعتمد على زاوية وقوع الإشعاع i.

تقدم المعادلة التالية مثالاً لتصحيح التأثيرات على زاوية السقوط للمستقبلات التي لها نفس الطول L حيث العاكس موضوعة بشكل متماثل على هذا الأخير [69]:

$$k(i) = 1 - \frac{f}{L}\left[1 + \frac{a^2}{48f^2}\right]\tan i \qquad (44.2)$$

11. أنواع المركزات (concentrator types):

من حيث المبدأ يمكن تصنيع أي مركز، حتى لو كان لوحًا مسطحًا لتتبع الشمس، ولكن من الناحية العملية، عادة ما يلجأ المرء إلى التتبع فقط مع المركزات ذات نسبة التركيز العالية بدرجة كافية، على سبيل المثال أكبر من حوالي 5. سيتم مسح أنواع المركزات الأكثر ملاءمة للتتبع في هذا فقرة.

نظرًا لأنه حتى الإشعاع الشمسي المباشر لا يتم موازنته تمامًا ولكنه يأتي من مجموعة من الاتجاهات (التي تتضخم بشكل أكبر بسبب الأخطاء البصرية)، يجب أن يكون للمستقبل حجم أدنى إذا كان سيعترض معظم الإشعاع الساقط. اختيار حجم الامتصاص الأمثل ينطوي على حل وسط بين الأداء البصري والحراري. إذا كان جهاز الامتصاص كبيرًا جدًا، فسيتم اعتراض معظم الإشعاع الشمسي الساقط ولكن فقدان الحرارة مفرط. من ناحية أخرى يمتلك جهاز امتصاص صغير جدًا فقدًا منخفضًا للحرارة ولكنه سيفتقد أيضًا الكثير من الإشعاع الشمسي المتاح.

1.11 عاكسات القطع المكافئ (Parabolic reflectors):

أحد أشهر المكثفات الشمسية هو العاكس المكافئ. يمكن بناؤها إما على شكل حوض أو كطبق. يمكن أن يتخذ جهاز الامتصاص مجموعة متنوعة من الأشكال والأكثر شيوعًا هو أن يكون مسطحًا أو دائريًا.

القطع المكافئ هو الشكل العاكس الفريد الذي يركز حزمة موازية من الإشعاع في نقطة واحدة. التركيز المثالي ممكن فقط للأشعة التي تقع موازية للمحور البصري (يساوي محور التناظر) للقطع المكافئ.

لن تفوت الحزمة الموازية القادمة من اتجاهات أخرى التركيز فحسب، ولكن بسبب الانحرافات خارج المحور للقطع المكافئ، فإنها لن تتقارب حتى في نقطة واحدة.

إذا أرادنا اعتراض جميع الأشعة بجهاز الامتصاص، فيجب أن يكون كبيرًا بدرجة كافية. يعمل مثال عاكس الحوض المكافئ مع أنبوب امتصاص أسطواني في **الصورة. 15.2** لتوضيح هذا الإجراء الخاص بتركيز المجمعات. يتم وضع أنبوب الامتصاص بشكل متركز حول الخط البؤري. إذا كان الشعاع ذو الانحراف الأكبر 6 سيصل إلى الامتصاص بالكاد، كما هو موضح في الخط المتقطع في **الصورة. 15.2**، فيجب أن يكون التركيز[70]:

$$C_{2D,parab,cyl,abs} = \frac{2x_A}{2\pi a} = \frac{\sin \emptyset}{\pi \sin \theta_a} = \frac{\sin \emptyset}{\pi} C_{ideal} \qquad (45.2)$$

حيث ϕ هي زاوية الحافة <AOB. ترتبط زاوية الحافة بعرض الفتحة D = 2xA والبعد البؤري f بواسطة:

$$\tan(\emptyset/2) = \frac{D}{4f} \qquad (46.2)$$

أقصى قيمة للمعدلة (46.2) يحدث عند $\phi = 90°$ درجة ويقل معامل π عن الحد المثالي. هذا هو الحال بالنسبة لجميع مكثفات التركيز أحادية المرحلة، أي أنها تصل فقط من ربع إلى نصف حد التركيز الديناميكي الحراري. يتم سرد نتائج مماثلة لأشكال هندسية أخرى للعاكسات المكافئة في **الجدول. 4.2** يرتبط الفشل في الوصول إلى الحد الديناميكي الحراري بخاصية القبول الزاوي. لا يحتوي القطع المكافئ المنفرد على قطع زاوي حاد ولكنه يقبل بعض الأشعة بزوايا تتجاوز زاوية القبول الاسمية θ_a (والتي تم تحديدها على أنها أكبر زاوية سقوط تصل فيها جميع الأشعة أو جميعها تقريبًا على الفتحة إلى المستقبل).

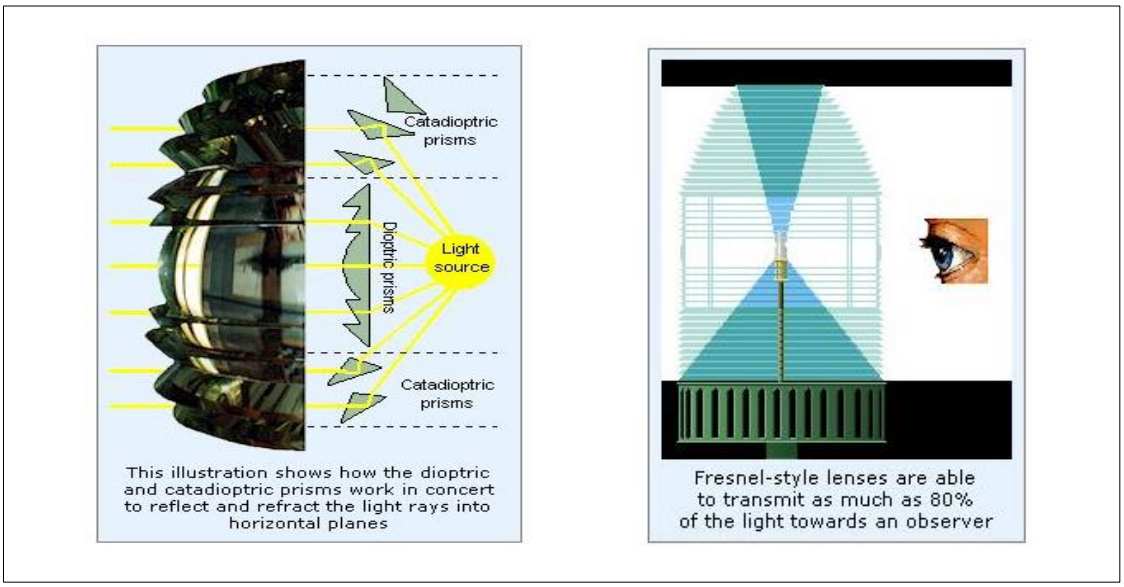
في الواقع هذا التحليل البسيط ليس هو الحل الكامل لأن توزيع الأشعة الساقطة لا يوجد به قطع حاد، كما يتم قبول بعض الأشعة من خارج زاوية القبول الاسمية. تحليل دقيق متضمن للغاية. كاختصار بسيط ، غالبًا ما يتخذ المرء قاعدة اختيار θ_a يساوي ضعف عرض جذر متوسط التربيع σ_r بعد ذلك من توزيع الإشعاع الساقط على جهاز الامتصاص. تتوافق هذه القاعدة مع اعتراض 95٪ من التوزيع الغاوسي، ويبدو أنها حل وسط معقول. تحسين أكثر دقة لنسبة التركيز يتضمن تقييم المكاسب الضوئية الإضافية مقابل الخسائر الحرارية المتزايدة[70].

الجدول. 2.2 – معدل التركيز C و النسبة بين مساحة سطح المرآة على مساحة الفتح A_m/A_{ap}، كدالة لزاوية الحافة ϕ و نصف زاوية القبول θ_a لمركز القطع المكافئ[70].

Type Absorber Shape	C	C for θ_a = ¼°	½°	1°	C/C_{ideal}	A_m/A_{ap}
2D (trough)						
Tube	$\frac{\sin\phi}{\pi \sin\theta_a}$	—	—	—	$\frac{\sin\phi}{\pi}$	$\left[\frac{1}{\cos(\phi/2)} + \left(\cos\frac{\phi}{2}\right)\right.$
Flat	$\frac{\sin\phi\cos(\phi+\theta_a)}{\sin\theta_a} - 1$	—	—	—	$\sin\phi\cos(\phi+\theta_a) - \sin\theta_a$	$\left.\times \log\cot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{4}\right)\right] / 2$
With optimal ϕ						
Round tube						
$\phi_{opt} = \frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{\pi \sin\theta_a}$	73	37	18	$\frac{1}{\pi}$	1.15
Flat						
$\phi_{opt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_a\right)$	$\frac{1}{2\sin\theta_a} - \frac{3}{2}$	113	56	27	$\frac{1}{2} - \frac{3}{2}\sin\theta_a$	1.03
3D (dish)						
Sphere	$\frac{\sin^2\phi}{4\sin^2\theta_a}$	—	—	—	$\frac{\sin^2\phi}{4}$	$\frac{2[1/\cos(\phi/2) - \cos^2(\phi/2)]}{3\sin^2(\phi/2)}$
Flat	$\frac{\sin^2\phi\cos^2(\phi+\theta_a)}{\sin^2\theta_a} - 1$	—	—	—	$\sin^2\phi\cos^2(\phi+\theta_a) - \sin^2\theta_a$	
With optimal ϕ						
Sphere $\phi_{opt} = \frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{4\sin^2\theta_a}$	13,000	3300	820	$\frac{1}{4}$	1.22
Flat						
$\phi_{opt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2} - \theta_a\right)$	$\frac{1}{4\sin^2\theta_a} - \frac{1}{2\sin\theta_a} - \frac{3}{4}$	13,000	3200	790	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}\sin\theta_a - \frac{3}{4}\sin^2\theta_a$	1.04

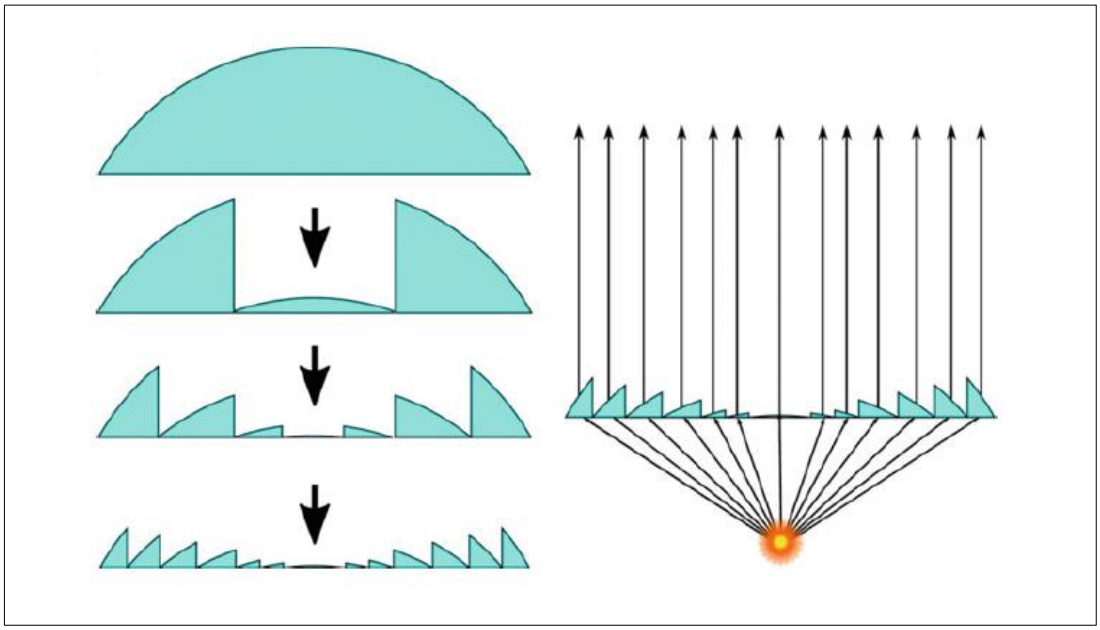
2.11 عدسات و مرايا فرينل:

من أجل جعل أشعة الضوء المتباينة المنبعثة من مصدر الضوء (النقطي) متوازية، نحتاج إلى عدسة ذات بُعد بؤري قصير f. من خلال وضعها أمام مصدر الضوء، مع وضع مصدر الضوء على بؤرة العدسة f، فإننا ننتج حزمة ضوئية موازية. تتطلب العدسات ذات البعد البؤري القصير نصف قطر انحناء صغير جدًا R، وإلا فإنها تحتاج إلى أن تكون سميكة. ومع ذلك فإن هذا النوع من العدسات ثقيل جدًا. سيكون الحل عبارة عن عدسات رفيعة ومنخفضة الوزن ومنخفضة الحجم ذات أبعاد بؤرية قصيرة. تم تقديم هذا الحل من قبل أوغسطين جان فرينل (1788- 1828)، عالم فيزياء فرنسي معروف من بين آخرين لاختراعه نوع خاص من العدسات، التي كانت تستخدم في المنارات **الصورة. 18.2**. تم استخدامها لتركيز الضوء أفقيًا وجعله مرئيًا لمسافات طويلة، مما يساعد السفن على تجنب الاصطدام بالصخور في البحر. مبدأ تشغيل عدسات فرينل بسيط للغاية. بالنظر إلى أن عملية الانكسار للعدسة تحدث على سطحها، عن طريق إزالة أكبر قدر ممكن من مادتها، مع الحفاظ على انحناء السطح لا يزال بإمكاننا الحصول على نفس النتيجة **الصورة. 19.2** [71].

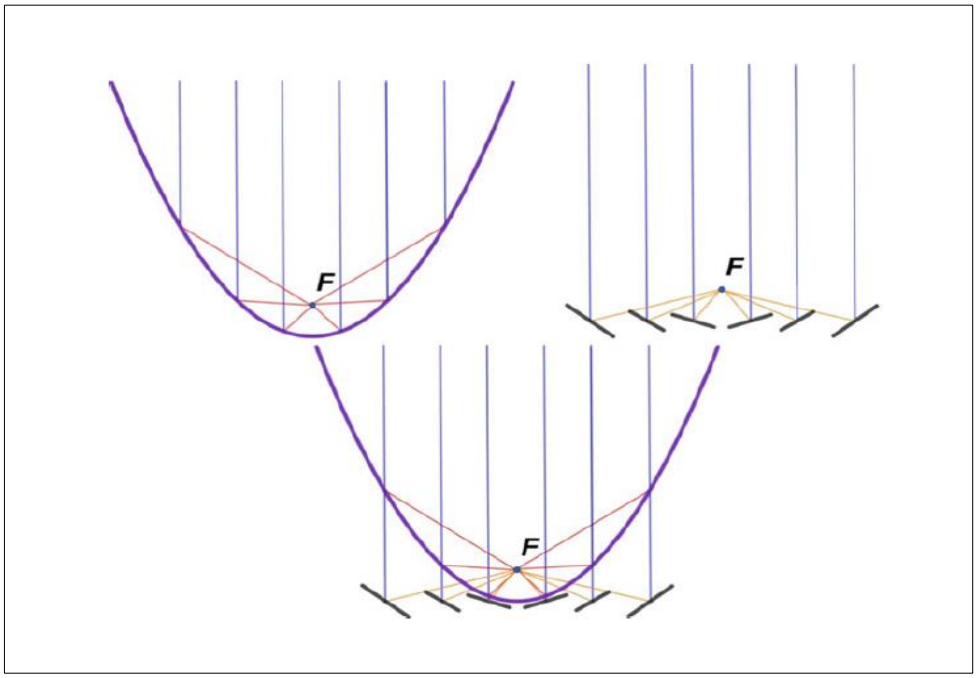


الصورة. 18.2 - عدسات فرينل المستعمل في المنارات و مبدأ عملها [72].

يمكن أيضًا تطبيق مبدأ تقسيم العنصر البصري (في الحالة السابقة، سطح العدسة) إلى أجزاء لها نفس التأثير البصري معًا، أو تأثيرًا مشابهًا جدًا مثل العنصر الأصلي على المرايا بطريقة مماثلة، يمكن إنشاء مرآة فرينل الخطية عن طريق استبدال حوض مكافئ بمقاطع خطية تركز الإشعاع الذي يصل إليها على الخط البؤري للحوض المكافئ الأصلي **الصورة. 20.2**. وبالمثل من الممكن تقسيم مرآة مكافئ (طبق مكافئ) إلى مقاطع حلقية تشكل مرآة فرينل دائرية[71].



الصورة. 19.2 - يتم تحويل العدسة الكروية المقربة العادية إلى عدسة فرينل مكافئة عن طريق ازالة سطحها المستمر. من اجل تقليل كمية المواد المستخدمة في العدسة التقليدية [71].

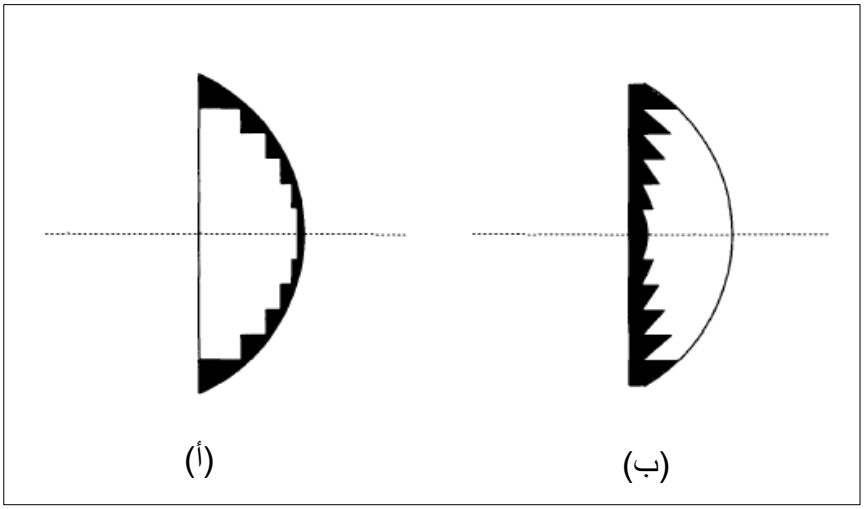


الصورة. 20.2 – رسم تخطيطي يبين مبدأ صناعة و عمل مرآة فرينل [71].

1.2.11 تاريخ عدسات فرينل (History of Fresnel Lenses):

يحدث الانكسار عندما يمر شعاع عبر أسطح تفصل بين المواد بمعاملات انكسار مختلفة. يحدد محيط هذه الأسطح خصائص التركيز للعنصر البصري. الجزء الأكبر من المادة بين الأسطح الانكسارية له تأثير ضئيل على الخصائص البصرية للعدسة. ربما منذ قرون مضت تم إدراك أن العدسة تحتاج إلى سطح واحد فقط لتحديد قدراتها البؤرية. يسمى هذا النوع بالعدسات المستوية المحدبة. في عام 1748 قطع جورج دي بوافون Georges de

Buffon المادة الداخلية لهذه العدسة المستوية المحدبة (إذا كان يفعل ذلك نظريًا فقط، مع أول عدسة مستوى فعلية تم إنشاؤها بواسطة AbM Rochon بعد حوالي ثلاثين عامًا، تظل غير واضحة). بدأ بوافون من الجانب المسطح، بحلقات متدرجة من اليسار متبعا الشكل الكروي الأصلي للعدسة **الصورة. 21.2**. تبع عمل بوافون عمل كوندورسيه والسير دي بروستر، وكلاهما يعمل بعدسات مبنية مصنوعة من حلقية متدرجة[73].



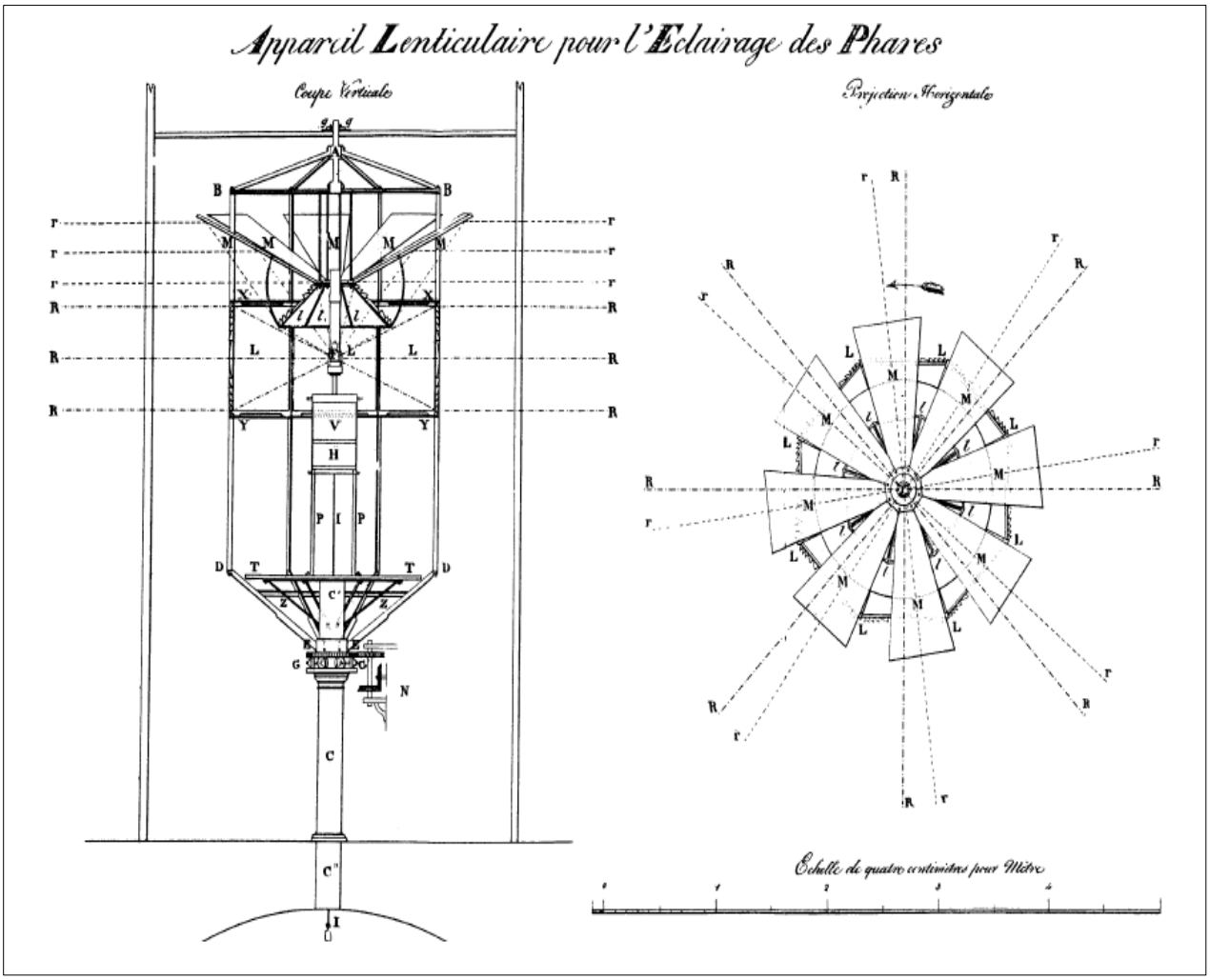
الصورة. 21.2 - عدسة بوافون السطحية المتدرجة لعام 1748 (أ) ، وعدسة فرينل لعام 1822 (ب). الأجزاء المظلمة مادية [73].

كان من المقرر استخدام هذه العدسات في المنارات، أولاً على طول نورماندي Normandy الفرنسي وسواحل بريتاني Brittany. في السابق كانت العدسات ثقيلة جدًا بحيث لا يمكن استخدامها على أسطوانة المنارة ، وضخمة جدًا بحيث لا يمكن تصنيعها بسهولة. بدلاً من العدسات، تم تجهيز معظم المنارات بمرايا معدنية مكافئة مزيت ضد التآكل، والتي تمتص ما يصل إلى نصف الضوء أثناء الانعكاس. في حالة استخدام عدسة عادية يتم امتصاص الأشعة جزئيًا من مصادر الضوء الضعيفة نسبيًا في مادة العدسة. كانت المنارات تعمل بالطاقة بواسطة مصابيح الزيت في تلك الأيام. عزز ذروة عصر الشحن البحري في القرن الثامن عشر تطوير ما سيعرف باسم عدسة فرينل[73].

تم اختراع عدسة فرينل رسميًا في عام 1822، عندما قدم فرينل أسطوانة المنارة الخاصة به إلى الأكاديمية الفرنسية للعلوم وقام بتثبيتها (ربما مجموعة أخرى) في منارة في كوردوان على نهر جيروند. يُنسب لأوغستين جان فرينل Augustin Jean Fresnel ، الذي ولد في 10 مايو 1788 في بروجلي أور (Broglie Eure)، وتوفي في 14 يوليو 1827 في فيل دافراي Ville d'Avrayبالقرب من باريس Paris، العديد من الإنجازات العلمية من بينها مساهمات في حل الخلاف بين النظرية الجسيم و النظرية الموجية للضوء والتداخل والاستقطاب والطبيعة العرضية للضوء والانعكاس والانكسار والانعكاس الداخلي الكلي وأخيراً وليس آخراً عدسات المنارة.

بالطبع عدسات منارة فرينل ليست مصممة لتركيز الأشعة الشمسية. إنها أجهزة تصوير ذات أخاديد وحواف مواجهة للخارج. من ناحية أخرى يمكن استخدام عدساته لتركيز الطاقة الشمسية. تمثل الأشعة R و r شعاعًا من

الضوء الموازي تقريبًا **الصورة. 22.2**، موجهًا نحو السفن القريبة من الساحل حيث أقيمت المنارة. بافتراض أن المصباح هو مصدر نقطي، فإن العدسة التي تخلق شعاعًا من الضوء المتوازي تسمى ميزاء. نظرًا لمبدأ رجعان (reversibility) الضوء والتقريب المسموح به لأشعة الشمس على أنها موازية، فإن الضوء القادم من الخارج ويمر بعدسات منارة فرينل سينكسر ويركز نحو L. اي سوف تعمل هذه العدسة كمجمع للضوء (مركز)[73].



الصورة. 22.2 - القرص الدوار فرينل لمنارة. منظر جانبية وأعلى ، مع مجموعتي العدسات التي تشكل مثمنين. تسمى الأشعة المكونة من العدسات الأكبر R ، بينما تسمى الأشعة التي تكونت بواسطة العدسات الأصغر (مع المرايا M) بـ r. الرسم الأصلي لعام 1822 [71].

كان الزجاج هو المادة المفضلة لصناعة عدسات فرينل حتى الخمسينيات من القرن الماضي، وقد تم تصنيع عدسات فرينل بتقنيات مماثلة لنماذج فرينل الاولى. تم تشكيل العدسات عالية الجودة، وتم سحق الأخاديد وصقلها. لتوفير تكلفة الإنتاج تم صب العدسات الأرخص عن طريق ضغط الزجاج في قوالب. لن يتم معالجة عملية الصب مما أدى إلى جودة بصرية سيئة للعدسة. التوتر السطحي العالي للزجاج مسؤول عن الأخاديد والأطراف المستديرة، وهي مشكلة تحدث أثناء التصلب[73].

حدثت المحاولات الأولى لاستخدام عدسات فرينل لتجميع الطاقة الشمسية في الوقت الذي أصبحت فيه المواد البلاستيكية المناسبة مثل بولي ميثيل ميثاكريلات أو PMMA متاحة في الخمسينيات من القرن الماضي. مادة البولي ميثيل ميثا اكريلات مقاومة لأشعة الشمس، وتبقى مستقرة حرارياً حتى 80°C على الأقل، وتطابق طيف النفاذية (spectral transmissivity) الخاصة بها مع الطيف الشمسي، قرينة انكسارها تساوي 1.49، وهو تركيز اكبر من الزجاج. الأكريليك هو المادة المفضلة لمعظم عدسات فرينل المنتجة اليوم.

بعض عدسات فرينل المستخدمة في تطبيقات الطاقة الشمسية مصنوعة من الزجاج. يعتبر الزجاج خيارًا جذابًا عند استخدام العدسات في درجات حرارة عالية أو عندما تتضاعف للتزجيج. السيليكون له تاريخ في صناعة عدسات فرينل، ويمكن استخدامه كركيزة تحت الزجاج. عدسات فرينل الحديثة لتركيز الطاقة الشمسية في الفضاء مصنوعة من السيليكون. إذا تم استخدام غطاء زجاجي، فإنه يعمل بمثابة درع واقي وعنصر هيكلي. يختار معظم مصممي العدسات في التطبيقات الأرضية PMMA لعدساتهم، حيث تسمح هذه المادة بجودة بصرية عالية مقترنة بتقنيات تصنيع أقل تكلفة.

أدت المواد البلاستيكية الحديثة وتقنيات التشكيل الجديدة وآلات الخراطة الماسية التي يتحكم فيها الكمبيوتر إلى تحسين جودة عدسات فرينل وفتحت آفاقًا جديدة لتصميم عدسات فرينل للعديد من التطبيقات. يمكن أن تكون عدسات فرينل مقولبة بالضغط أو مقولبة بالحقن أو مقطوعة أو مقذوفة من مجموعة متنوعة من البلاستيك. تكاليف الإنتاج للعدسات الكبيرة منخفضة[73].

2.2.11 التطبيقات النموذجية لعدسات فرينل:

- العدسات (ثلاثية الأبعاد) لأجهزة العرض العلوية: مكثفات لاتحادات محدودة.
- عدسات التصوير (2D) لماكينات النسخ: تجميع تركيز شعاع ضوء موازى (متوازي).
- العدسات الميدانية وشاشات تركيز الكاميرا: المكثفات حيث تواجه الأخاديد المترافق الأقصر والتي يتم تجنبها عادةً للأسباب الموضحة أعلاه.
- المكبرات أو عدسات القراءة التي تنشئ صورًا افتراضية.
- تطبيقات الأشعة تحت الحمراء، التصوير المجسم، الاتصالات (عدسات لنقل البيانات)، مراقبة العمليات، إلخ .
- المنارات، إذا لم يتم استبدالها بأنظمة تحديد المواقع الإلكترونية.
- تطبيقات الطاقة الشمسية: مجمعات الأشعة الشمسية للاستخدامات الحرارية والطاقة الكهروضوئية، وتصميمات خاصة لضوء النهار إلخ[73].

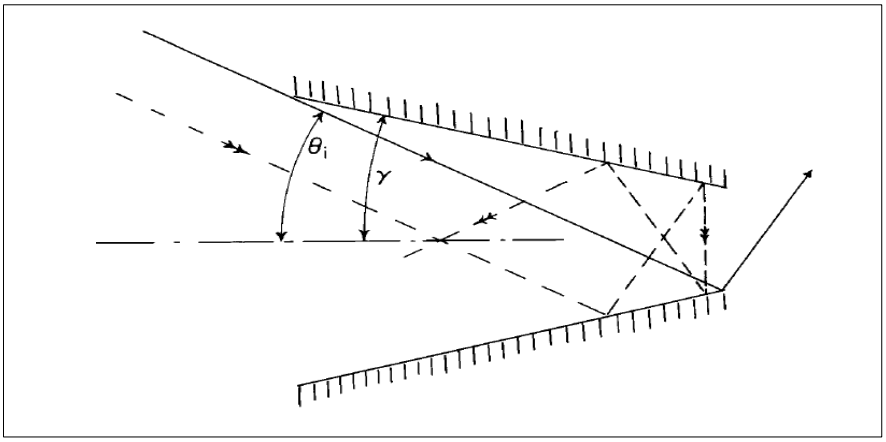
3.11 المخاريط:

الشكل البدائي للمركزات غير التصويرية هو المخروط الضوئي، استخدم لسنوات عديدة. توضح **الصورة. 23.2** مبدأه.

إذا كان للمخروط نصف زاوية γ وإذا كانت u_i هي زاوية الإدخال القصوى، فإن الشعاع المشار إليه سيمر بعد

انعكاس واحد فقط إذا $2\gamma = (\pi / 2) - \theta_i$ من السهل الوصول إلى تعبير لطول المخروط لقطر فتحة دخول معين[74].

أيضًا من السهل ملاحظة أن بعض الأشعة الأخرى التي تسقط بزاوية θ_i مثل تلك المشار إليها بالسهم المزدوج، ستعود للخلف بواسطة المخروط. إذا استخدمنا مخروطًا أطول به مزيد من الانعكاسات، فإننا لا نزال نجد بعض الأشعة بزاوية θ_i تتراجع الى الخلف. من الواضح أن المخروط بعيد كل البعد عن كونه مركزًا مثاليا[74].



الصورة. 23.2 – المركز المخروطي[74].

4.11 المركز المركب المكافئ (CPC):the Compound Parabolic Concentrator

تعود أصول هذه المركزات إلى أدوات للكشف عن إشعاع شيرينكوف (Cherenkov radiation) في تجارب الفيزياء عالية الطاقة، وهو تطور لاحظه (Hinterberger و Winston) سنة 1966. حدث لها تطور مستقل ومتوازي في الاتحاد السوفياتي (Baranov and Melnikov، 1966). أشار وينستون سنة 1974 إلى إمكاناتها كمركزات للطاقة الشمسية، وكانت أساس الدراسة التفصيلية منذ ذلك الحين بواسطة Welford و Winston سنة (1978)، وRabl (1976a , b)، والعديد من الآخرين[74].

المفهوم الأساسي لمركز المركب المكافئ موضح في **الصورة. 24.2**. ينتمي مركز CPC إلى فئة المركزات غير التصويرية. تتمتع بزاوية قبول واسعة وتتطلب فقط تتبعًا متقطعًا. تعتبر هندسة CPC ذات فائدة كبيرة لحصاد الطاقة الشمسية وقد شهدت تطورًا كبيرًا في السنوات الأخيرة [75].

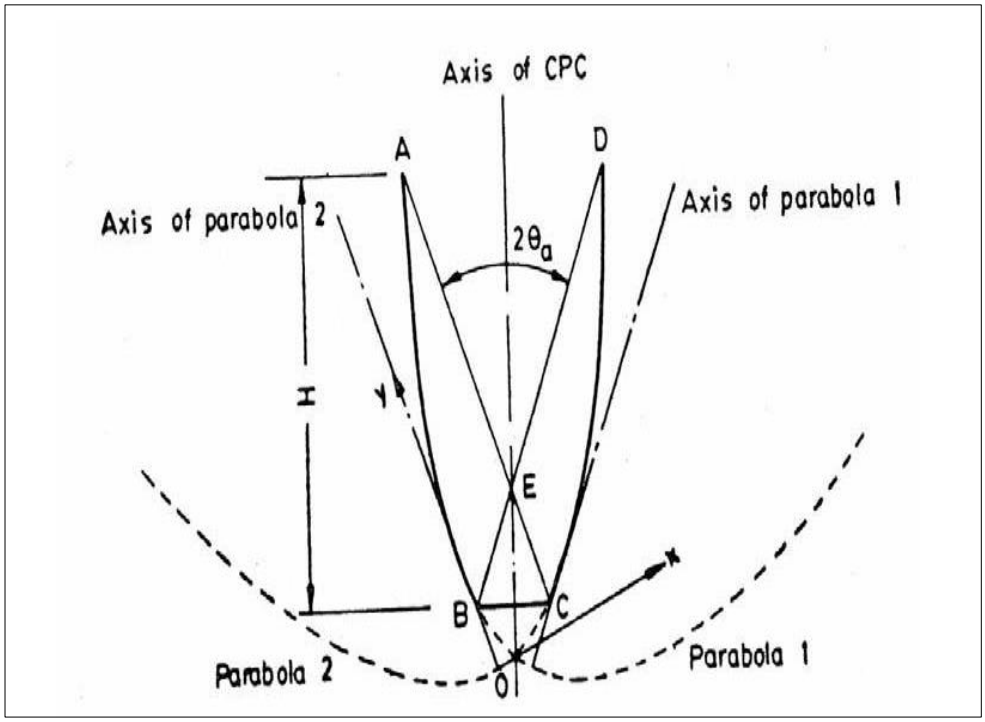
1.4.11 هندسة (CPC):

توضح **الصورة. 24.2** هندسة (CPC) ثنائية الأبعاد. يتكون المركز من جزأين AB و DC وهما جزآن من قطعين مكافئين 1 و 2. AD هي الفتحة بعرض W و BC سطح الامتصاص بعرض b. محاور القطعين المكافئين موجهان نحو بعضهما البعض بزاوية بحيث تكون النقطة C هي بؤرة القطع المكافئ (1) والنقطة B هي بؤرة القطع المكافئ (2). مماسات القطع المكافئ عند النقطتين A و D موازية لمحور CPC [63].

زاوية قبول (CPC) هي الزاوية (AED) $(2\theta a)$ التي تشكلها الخطوط التي تم الحصول عليها من خلال وصل كل بؤرة إلى الجانب المعاكس لها من الفتحة. يتم تحديد معدل التركيز من خلال:

$$C = \frac{w}{b} = \frac{1}{\sin\theta_a} \qquad (47.2)$$

معدل التركيز هذا هو أقصى قيمة ممكنة من زاوية القبول $2\theta_a$.



الصورة. 24.2 - رسم تخطيطي يوضح هندسة CPC[63].

باستخدام نظام إحداثيات x-y الموضح في **الصورة. 24.2**، مع اخذ نقطة المبدأ 0 عند قمة القطع المكافئ 2، من السهل إظهار أن معادلة القطع المكافئ 2 هي:

$$y = \frac{x^2}{2b(1+\sin\theta_a)} \qquad (48.2)$$

حيث يعطى البعد البؤري بواسطة:

$$OB = \frac{b}{2}(1+\sin\theta_a) \qquad (49.2)$$

إحداثيات النقاط الحدية للمنحى CD هي كما يلي:

النقطة C:

$$x = b\cos\theta_a \quad ، \quad y = \frac{b}{2}(1-\sin\theta_a) \qquad (50.2)$$

النقطة D:

$$x = (b + W)\cos\theta_a \quad ، \quad y = \frac{b}{2}(1 - \sin\theta_a)\left(1 + \frac{1}{\sin\theta_a}\right) \qquad (51.2)$$

يتم إعطاء النسبة بين الارتفاع و الفتح للمركز من خلال:

$$\frac{H}{W} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sin\theta_a}\right)\cos\theta_a = \frac{1}{2}(1 + C)\left[1 - \frac{1}{C^2}\right]^{1/2} \qquad (52.2)$$

يتم الحصول على سطح التركيز بالتكامل على طول القوس المكافئ. النسبة بين مساحة المركز ومنطقة الفتح هي: A_{con}/WL ، لقيم نسبة التركيز أكبر من 3 يمكننا إظهار أنه يمكننا استخدام التعبير التالي (الذي يتنبأ بالقيم بدقة أكبر من 5%):

$$\frac{A_{con}}{WL} = 1 + C \qquad (53.2)$$

متوسط عدد الانعكاسات m التي تعرضت لها كل الإشعاعات التي تدخل بزاوية القبول قبل الوصول إلى سطح الامتصاص تُعطى بالعبارة:

$$m = \frac{1}{2\sin\theta_a}\left(\frac{A_{con}}{WL}\right) - \frac{(1 - \sin\theta_a)(1 + 2\sin\theta_a)}{2sin^2\theta_a} \qquad (54.2)$$

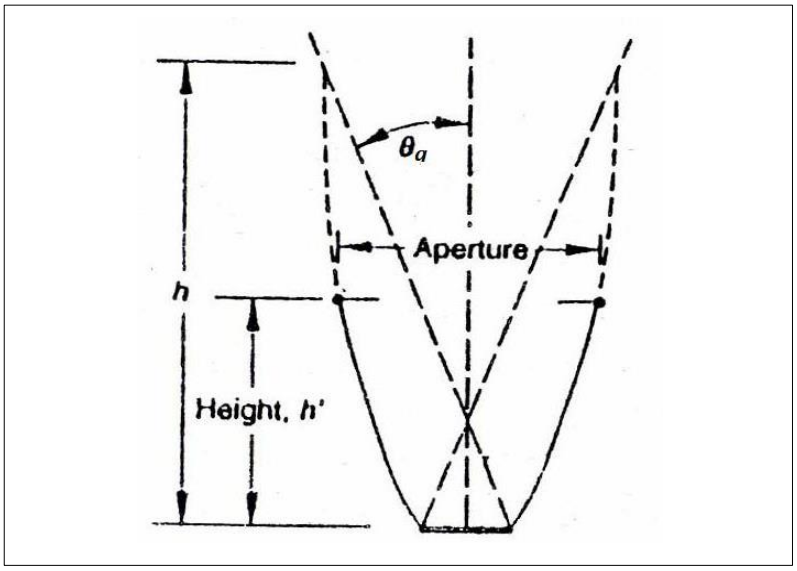
وبالتالي يتم إعطاء الانعكاسية الفعال لسطح المكثف من خلال:

$$\rho = r^m \qquad (55.2)$$

حيث ρ هي الانعكاسية الفعالة و r هي قيمة الانعكاسية لانعكاس واحد [76].

بالمقارنة مع المكثف الأسطواني المكافئ، فإن (CPC) عميقة جدًا وتتطلب مساحة سطح كبيرة من التركيز لفتحة معينة. ومع ذلك فقد ثبت أنه يمكن التخلص من الجزء العلوي من (CPC) بانخفاض طفيف في الأداء. وبالتالي من الناحية العملية يتم اقتطاع (CPC) بشكل عام (تقليل الارتفاع) بحوالي 50% من أجل تقليل تكلفتها. يتم عرض (CPC) المقتطعة في **الصورة. 25.2**. يؤثر الاقتطاع المحدود على زاوية القبول بشكل ضئيل للغاية، لكنه يغير النسبة: الارتفاع / الفتحة ومعدل التركيز ومتوسط عدد الانعكاسات التي تعرض لها الإشعاع قبل وصوله إلى السطح الماص[62].

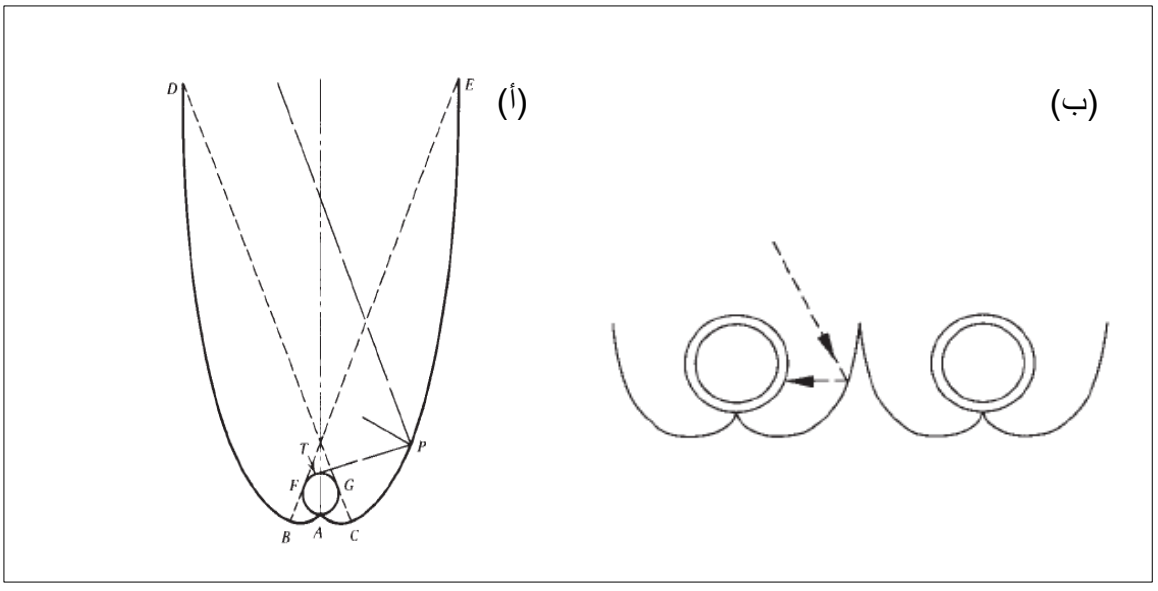
يجب أن تحتوي المركزات المكافئة المركبة ذات المستقبلات المسطحة على فجوة بين المستقبل والعاكس لمنع العاكس من العمل كزعنفة موصلة للحرارة من المستقبل. تؤدي الفجوة إلى فقدان منطقة العاكس وخسارة مقابلة في الأداء ويجب أن تظل صغيرة[62].



الصورة. 25.2 - CPC تم اقتطاع بحيث تكون نسبة ارتفاعها حوالي نصف الارتفاع الكامل [62].

استندت المناقشة السابقة على مستقبلات مسطحة تحتل المستوى بين البؤرتين **الصورة. 26.2 (أ)**. يمكن استخدام أشكال أخرى من المستقبلات، يمكن تطوير CPC بفتحة W والتي ستركز الإشعاع الساقط بزوايا وقوع بين: $\pm \theta_a$ على أي ماص محدب مع: $W \sin \theta_a$.

توضح **الصورة. 26.2 (ب)** طريقة توليد شكل CPC، والذي يوضح حالة ذات أهمية خاصة، ماص أسطواني. الجزآن AB و AC للعاكس متوافقة مع الأجزاء AF و AG من جهاز الامتصاص.



الصورة. 26.2 - (أ) CPC لجهاز استقبال اسطواني. (ب) عاكس منحني لاستخدامه مع جهاز استقبال اسطواني [62].

الشرط لبقية العاكس هو أنــه في أي نقطة P، يجب أن يقسم الناظـــم على سطح العاكس NP الزاوية بين المماس PT للماص وخط QP، والذي يصنع زاوية θ_a من محور CPC. يتم استخدام CPC هذا مع المستقبلات الأنبوبية المفرغة. يمكن اقتطاعها بنفس طريقة اقتطاع CPC الأخرى. يمكن استخدام هذه الطريقة لتوليد عاكس لأي شكل من أشكال المستقبل المحدب.

يمكن تطوير مجموعة من المركزات من نوع CPC (وليس بالضرورة القطع المكافئ) تدريجيًا وبالتالي السماح بمجموعة متنوعة من الخيارات لشكل المستقبل. يمكن استخدام مركز CPC في سلسلة، يمكن أن يكون مستقبل المكثف الأساسي هو فتح لمركز ثانوي. لا يحتاج المركز إلى أن يكون متماثلًا.

غالبًا ما تستخدم الماصات الأنبوبية مع عاكسات CPC [62]. يظهر شكل العاكس الذي ينتج عنه أقصى امتصاص للإشعاع بواسطة الماصات الأسطوانية في الصورة. 26.2.

2.4.11 التوجيه والطاقة الممتصة لمركز CPC:

تتمثل إحدى مزايا مركزات CPC في قدرتها على جمع الإشعاع الشمسي دون التتبع المستمر للشمس وتحقيق مستوى معين مــن التركيز. ومع ذلك يجب أن تكــون موجهة بشكل صحيح لزيادة امتصاص الإشعاع.

يكون الاتجاه الفعال لمثل هذا المركز على طول المحور الأفقي بين الشرق والغرب مائلًا نحو خط الاستواء وقابل للتعديل حول هذا المحور. يتم تنظيم CPC بحيث تكون الزاوية الزائفة لوقوع إشعاع الحزمة (إسقاط زاوية السقوط على المستوى الرأسي بين الشمال والجنوب) في حدود $\pm \theta_a$.

لتقدير الإشعاع الذي يمتصه مستقبل CPC من الضروري تحديد ما إذا كانت زاوية حدوث الإشعاع الشمسي المباشر متضمنة في زاوية القبول $2\theta_a$، ثم تقدير مساهمات حزمة الإشعاع المنتشر، ينعكس الإشعاع من الأرض إذا كان في زاوية القبول. يمكن تقدير الإشعاع الممتص على النحو التالي:

$$S = A_a\left(G_{b,CPC}\tau_{c,b}\tau_{CPC,b}a_b + G_{d,CPC}\tau_{c,d}\tau_{CPC,d}a_d + G_{g,CPC}\tau_{c,g}\tau_{CPC,g}a_g\right) \qquad (56.2)$$

$$G_{b,CPC} = F g_{bn}\cos\theta \quad Si \quad (\beta + \theta_a) < 90° \qquad (57.2)$$

$$G_{d,CPC} = \frac{G_d}{C} \qquad (58.2)$$

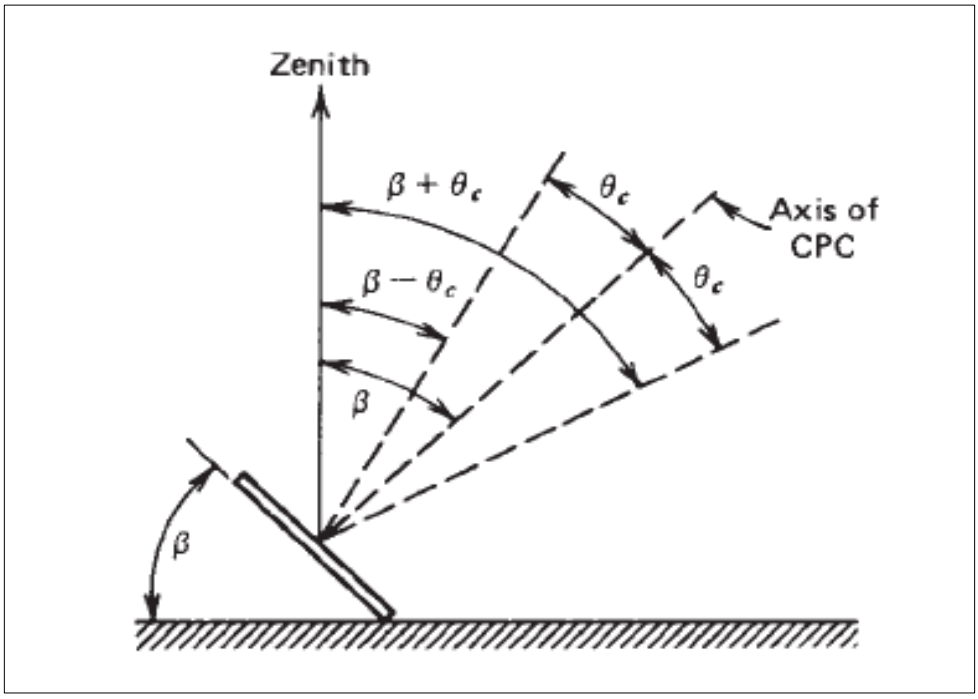
$$G_{d,CPC} = \frac{G_d}{2}\left(\frac{1}{c} + \cos\beta\right) \quad Si \quad (\beta + \theta_a) < 90° \tag{59.2}$$

$$G_{g,CPC} = 0 \qquad Si \quad (\beta + \theta_a) < 90° \tag{60.2}$$

$$G_{g,CPC} = \frac{G_d}{2}\left(\frac{1}{c} - \cos\beta\right) \quad Si \quad (\beta + \theta_a) < 90° \tag{61.2}$$

الحد الأول في المعادلة (56.2) هو مساهمة الحزمة في S، والثاني هو مساهمة الإشعاع المنتشر، والثالث هو مساهمة الإشعاع المنعكس من الأرض.

في الحد الأول $G_{\mathrm{b,\,CPC}}$ هو الإشعاع المباشر عند الفتحة الموجودة في زاوية القبول، $\tau_{c,\mathrm{b}}$ هي نفاذية طلاء المركز و $G_{\mathrm{b,\,CPC}}$ هي معامل الامتصاص للمستقبل. العامل $\tau_{\mathrm{b},CPC}$ هو نفاذية مكثف CPC الذي يحسب خسائر الانعكاس وهو دالة لمتوسط عدد الانعكاسات. العوامل في حد الإشعاع المنعكس و المنتشر على الأرض مماثلة لتلك الخاصة بالإشعاع المباشر. يكون الإشعاع المنعكس من الأرض فعالاً فقط إذا كانت $(\beta + \theta_a) > 90°$، أي إذا "رأى" المستقبل الأرض. تظهر الزوايا في **الصورة. 27.2**.



الصورة. 27.2 - اسقاط زاوية القبول لـ CPC على المستوي شمال-جنوب و منحدر لـ (CPC) على محور شرق-غرب. [62].

توضح **الصورة. 27.2** زاوية القبول (CPC) على المستوى العمودي شمال- الجنوب، باتجاه الشرق والغرب. الزاويتان $(\beta - \theta a)$ و $(\beta + \theta a)$ هما الزاويتان من العمود على هذا المستوى عند الحدين اللذين يحدان زاوية القبول. يجب استيفاء الشرط التالي ليكون الإشعاع المباشر فعالاً:

$$(\beta - \theta_a) < \tan^{-1}(\tan i_z \cos \gamma_s) < (\beta + \theta_a) \qquad (62.2)$$

3.4.11 الكفاءة البصرية لمركز CPC:

الكفاءة البصرية هي الكفاءة التي يمكن للمُركز من خلالها عكس وتركيز الإشعاع. يمكن إعطاء الكفاءة البصرية من خلال العلاقة:

$$\eta_0 = \gamma r^m \qquad (63.2)$$

او:

$$\eta_0 = \gamma \rho \qquad (64.2)$$

لأي نظام تركيز بطبقة نقل وماص τ مع معامل امتصاص α، يمكن حساب الكفاءة الضوئية من العلاقة [77]:

$$\eta_0 = \gamma \tau \rho \alpha \qquad (65.2)$$

12. الخلاصة:

يعد استخدام الطاقة الشمسية قديمًا قدم التاريخ البشري، وكما هو الحال في المجالات التكنولوجية الأخرى، تعتبر أول خطوة في النجاح في استغلال الطاقة الشمسية هي الفهم الجيد لجوانبها العلمية الأساسية و هو ما تم التطرق اليه في هذا الفصل. لقد تم تحديد الخصائص الأساسية للشمس والإشعاع الذي ينبعث منها، كما تم التطرق للثابت الشمس الذي يمثل متوسط كثافة تدفق الإشعاع خارج الغلاف الجوي للأرض و يساوي $1366 W/m^2$ (في حدود $\pm$ 3%)، مع معظم الإشعاع في نطاق الطول الموجي $0.3 - 3\ \mu m$ هذا الإشعاع له خصائص اتجاهية يتم تحديدها من خلال مجموعة من الزوايا التي تحدد زاوية سقوط الإشعاع على السطح. يناقش هذا الفصل ايضا الإشعاع خارج الأرض وهندسة الأرض والشمس. و تأثير الغلاف الغازي للأرض على شدة الاشعاع الشمسي الساقط. و كما تم ادراج موضوع الإشعاع الساقط الطيفي المرجعي لكتلة هواء 1.5.

و ختم هذا الفصل بدراسة نظرية للمركزات الشمسية، لان الاستخدام الجيد للطاقة الشمسية يتطلب زيادة تركيزها في مختلف التطبيقات. تم تنفيذ العديد من التصاميم لمجمعات التركيز، كما يعد تحسين الطاقة الشمسية التي يلتقطها

المجمع الشمسي ذا أهمية كبيرة لكفاءة نظام التجميع بشكل عام و في منظومات الليزر الشمسي بشكل خاص و التي سنتطرق اليها في الفصل الموالي. في الواقع يجب تحسين العديد من المعلمات التي يمكن أن تؤثر على طاقة المجمع مسبقًا. يهدف هذا التحسين إلى تقليل زاوية سقوط الإشعاع الشمسي على المجمع، حيث يعد اتجاه المجمع الشمسي هو العامل الرئيسي في هذا التقليل لأنه يأخذ في الاعتبار موقع الشمس ومسارها وموقع المجمع على سطح الأرض ونظام التتبع الشمسي المختار. تؤثر كل هذه العوامل بشكل او بآخر على كفاءة منظومات الليزر الشمسي.

الفصل الثالث

الليزر الشمسي

دراسة نظرية ونبذة تاريخية

3.الليزر الشمسي دراسة نظرية ونبذة تاريخية

1. مقدمة:

ما هو الليزر الشمسي؟

يعد الليزر المضخ بضوء الشمس Solar Pumped Laser اختصارا (SPL) مباشرة من المعدات المناسبة التي يمكنها تحويل ضوء الشمس واسع النطاق الترددي إلى ليزر ضيق النطاق، بالمقارنة مع الليزرات التي تعمل بالكهرباء، فإن الليزر الشمسي أبسط وموثوق به كثيرًا بسبب الإزالة الكاملة لمعدات توليد الطاقة الكهربائية وتكييفها، مما يوفر احتمال حدوث انخفاض كبير في تكلفة الإشعاع البصري المتماسك لتطبيقات الطاقة العالية و المتوسطة، مما يؤدي إلى العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية في السنوات القادمة. مع مزايا الهيكل البسيطة والكفاءة العالية والعمر الطويل.

تعتبر أجهزة الليزر التي تعمل بالطاقة الشمسية مرغوبة للغاية في توفير إشعاع ليزر متماسك وفعال من حيث التكلفة بطريقة صديقة للبيئة، خاصة في الأماكن التي تكثر فيها الشمس وتندر فيها مصادر الطاقة الأخرى(الفضاء الخارجي). لذلك الليزر الشمسي هو مرشح طبيعي للتطبيقات التي يكون فيها ضوء الشمس وفيرًا. وبالتالي فهي تقنية ناشئة في المستقبل للتطبيقات الفضائية [78،79] حيث يلزم فترات تشغيل ممتدة وحيث يكون صغر الحجم والموثوقية والكفاءة أمرًا بالغ الأهمية. نظرًا لأن الطاقة الشمسية هي مصدر الطاقة المستمر الرئيسي في الفضاء، فيمكن استخدامها لضخ ليزر الحالة الصلبة إما بشكل مباشر أو غير مباشر. في الضخ الشمسي غير المباشر، يضيء الإشعاع الشمسي الخلايا الشمسية لإنتاج الكهرباء، التي تشغل ليزرات الصمام الثنائي. ومع ذلك فإن الضخ المباشر بالطاقة الشمسية يوفر خطوتين لتحويل الطاقة. يتمثل أحد أوجه القصور المهمة في مصفوفات أشباه الموصلات في محدودية عمرها الافتراضي وتدهور الأداء بمرور الوقت، والذي يبدو أنه يتناسب مع مستوى متوسط طاقة الإصدار. بالنسبة لأنظمة الليزر عالية الطاقة، يعد عمر هذه الأجهزة أحد العوامل الرئيسية التي تحد من عمر نظام الليزر أو حتى النظام بأكمله في حدود 3 سنوات تقريبًا [80]. إن تجنب (صفائف ليزر أشباه الموصلات) تمامًا عن طريق الضخ الشمسي المباشر لليزر الحالة الصلبة يُظهر إمكانية التغلب على القيود الحالية، مما يتيح عملية ليزر موثوقة محمولة في الفضاء على مدى عدة سنوات. نظرًا لأن قوة ضوء الشمس في الفضاء تبلغ ضعف ما هو عليه على الأرض، وهناك أربع أو خمس اضعاف ساعات من ضوء الشمس بسبب عدم وجود تأثير الغيوم، فإن توليد الطاقة الشمسية من الفضاء سيكون خطوة كبيرة إلى الأمام من حيث توفير احتياجات الطاقة.

2. تطبيقات الليزر الشمسي:

من بين التطبيقات الفضائية المحتملة لليزر الشمسي، الاستشعار عن بعد من الفضاء، واتصالات الفضاء

السحيق، وأشعة الليزر اللاسلكية للطاقة الفضائية[81]، و حرف مسار الكويكبات، واجهزة الدفع الضوئية الخالية من الوقود[82]، وإزالة الحطام الفضائي المداري [83،84].

يحتوي الليزر الشمسي أيضًا على إمكانات كبيرة للتطبيقات الأرضية مثل المعالجة القائمة على الليزر للمواد وإنتاج المواد الدقيقة / النانوية ودورات الطاقة المتجددة. تم مؤخرًا إيلاء اهتمام خاص لدورة المغنيسيوم المتجددة (Mg) - الهيدروجين (H_2) التي قد تقودنا إلى حضارة مستقبلية خالية من الوقود الأحفوري قائمة على (Mg) [79،85]. تنبعث كميات كبيرة من الحرارة و H_2 من تفاعل المغنيسيوم مع الماء. يتمتع Mg بإمكانيات كبيرة كمصدر للطاقة لأنه يحتوي على كثافة تخزين طاقة أعلى بعشر مرات من كثافة H_2. يمكن تخزينه ونقله بسهولة على شكل "كريات" وعند الضرورة يتفاعل مع الماء لإنتاج كل من H_2 والطاقة الحرارية لتطبيقات مركبات خلايا الوقود. ومع ذلك فإن حوالي 4000 كلفن ضروري للاختزال (MgO)[86]. نظرًا لعدم وجود طريقة عملية للوصول إلى درجة الحرارة هذه عن طريق التركيز المباشر لأشعة الشمس على MgO باستخدام البصريات التقليدية، أصبحت أشعة الليزر التي تعمل بالطاقة الشمسية بجودة شعاع ممتازة ضرورية، حيث يمكن تركيزها على بقعة صغيرة، تتجاوز 4000 كلفن. يتم ارجاع MgO مرة أخرى إلى Mg بواسطة أشعة الليزر[85،86].

3. اسس تقنية الليزر الشمسي:

تتكون منظومة الليزر الشمسي من عدة اجزاء لها دور اساسي في تحقيق غاية المنظومة، و يمكن تصنيفها كما يلي:

- منظومة التركيز الاولية.
- منظومة التركيز الثانية.
- منظومة التبريد.
- منظومة التتبع.
- وسط الليزر (الوسط الفعال).
- مرنانة الليزر او التجويف الرنين.

1.3 منظومة التركيز الاولية (Primary stage concentrator):

يصنف الليزر الشمسي ضمن ليزرات الحالة الصلبة و التي يتم ضخها عادة بالضوء، اين يستعمل هنا ضوء الشمس لعملية الضخ. نظرًا لأن ضوء الشمس الطبيعي لا يوفر تدفقا كافيا لتحقيق كثافة ضخ أكبر من العتبة اللازمة لإثارة وسط التضخيم لنظام الليزر. تتطلب معظم أجهزة الليزر التي يتم ضخها بضوء الشمس عامل تركيز بالآلاف للحصول على مكاسب كافية في الوسط النشط المشع. لذلك هناك حاجة إلى بصريات عالية التركيز الشمسي. كما سيتم التحقق منه في الفقرات التالية، في بداية الامر كان استخدام المرايا القطعية المكافئة اكثر انتشارا حتى سنة

2007 بعد استخدام عدسات فرينل كمركزات أولية للطاقة الشمسية زادت كفاءة تجميع الليزر الشمسي بشكل كبير [16]، والتي دفعت الباحثين في مجال الطاقة الشمسية إلى التخلي عن مزايا المرايا المكافئة بعض الوقت. على الرغم من أن عدسات فرينل فعالة من حيث التكلفة فيمكن تصنيعها بأحجام كبيرة، إلا أن الإشعاع المنتشر إلى حد كبير على طول المنطقة البؤرية يعوق تركيز الضوء الفعال إلى وسط الليزر الصغير والرقيق. وبالتالي لتحقيق كفاءة ليزر شمسي أعلى باستخدام عدسة فرينل، فإن القضيب الأكبر يكون أكثر ملاءمة [16، 18، 31، 87]، مما يجعله بدوره أقل مقاومة للإجهاد الحراري. وبدلاً من ذلك تسمح المرايا القطعية المكافئة بتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي الوارد.

2.3 منظومة التركيز الثانية (Second-stage concentrator):

نظرا لصغر قطر قضيب الليزر تحتاج منظومة الليزر الشمسي لأنظمة تركيز اضافية تتمثل عادة في: عدسات محدبة من السيليكا، مخاريط من السليكا، مرايا مخروطية، مرايا من نوع 2D-CPC و 3D-CPC، و ادلة موجية، و الياف بصرية. بالإضافة الى ذلك تحتوي منظومة التركيز الثانوية على تجويف بصري يتكون عادة من ماريا مخروطية او مرايا من نوع 2D-CPC و 3D-CPC او مرايا على شكل حرف V، تعمل هذه المركزات على زيادة تركز و توجيه ضوء الشمس المركز نحو قضيب الليزر، كما تلعب هذه المركزات دور التجويف الذي يجتازه ماء التبريد.

3.3 منظومة التبريد (Cooling system):

يعد الاختلاف بين طاقة ضخ الفوتونات وطاقة فوتونات الليزر في الليزر الصلب الذي يتم ضخه بصريًا هو السبب الرئيسي للحرارة المتولدة في الشبكة البلورية لوسط الليزر بالإضافة إلى الحرارة الناتجة عن الانتقالات غير الليزرية non-laser و الاسترخاء غير الإشعاعي و كذلك امتصاص إشعاع الضخ بواسطة المادة المضيفة يؤدي امتصاص البلورة للضوء إلى زيادة درجة حرارتها، وإذا زادت درجة حرارتها، ينخفض تحويلها البصري بسرعة كبيرة (<< 30%). لذلك من الضروري الحفاظ على البلورة عند درجة حرارة منخفضة وثابتة لتجنب تلفها ووجود نفس قيمة التحويل. لذلك سيكون من المفيد تبريد بلورة الليزر، سيكون هناك تشوه أقل للبلورة وبالتالي يمكن الحصول على جودة أفضل لشعاع الليزر.

تعتبر الموصلية الحرارية عاملاً مقيدًا للعديد من بلورات الليزر، حيث تزداد مع انخفاض درجة الحرارة. يمكن أن يؤدي تسخين بلورة الليزر من امتصاص الإشعاع الشمسي المركّز إلى إتلاف بلورة الليزر. يتم استخدام الماء لتبريد قضيب الليزر بسبب الناقلية الحرارية العالية و اللزوجة المنخفضة والـحرارة النوعية له، حيث يتـم تصميم مسار دوراني للمـــاء ضمن التجويف البصري لضمان معدل تدفق مياه كاف. و قد تم استخدام سائل تبريد

آخر و هو عبــارة عن مزيج دهان مــائي ابيض مستحلب و مقارنته مـــع الماء سنة 2018 من قبـــل C. J. C. SMYTH و من معه كما بينا ذلك في النبذة التاريخية[88].

4.3 منظومة التتبع الشمسية (Solar tracking system):

نظام التتبع هو جهاز متطور يتكون من دوائر تحكم إلكترونية وعناصر ميكانيكية توجه المركز او المرايا العاكسة نحو الشمس في جميع الأوقات من شروق الشمس إلى غروبها. توجد فئتان رئيسيتان من آليات التتبع، المتتبع أحادي المحور والمتتبع ثنائي المحاور. كما يوحي الاسم، فإن المتتبع أحادي المحور لديه درجة واحدة من حرية الدوران حول محور موازٍ تقريبًا لمحور دوران الأرض الذي يسمح له بمتابعة حركة الشمس من الشرق إلى الغرب خلال النهار. يتعذر على أجهزة التتبع أحادية المحور تتبع الشمس بدقة مطلقة بسبب الاختلاف الموسمي لإمالة المستوى الاستوائي للأرض فيما يتعلق بالمستوى المداري للأرض. نظرًا لوجود درجتين من حرية الدوران، فإن أجهزة التتبع ثنائية المحاور قادرة على المحاذاة المثالية مع الشمس في جميع الأوقات، مما يوفر الأداء الأمثل على مدار العام. تستخدم متعقبات الشمس لزيادة كفاءة منظومة الليزر الشمسي[89].

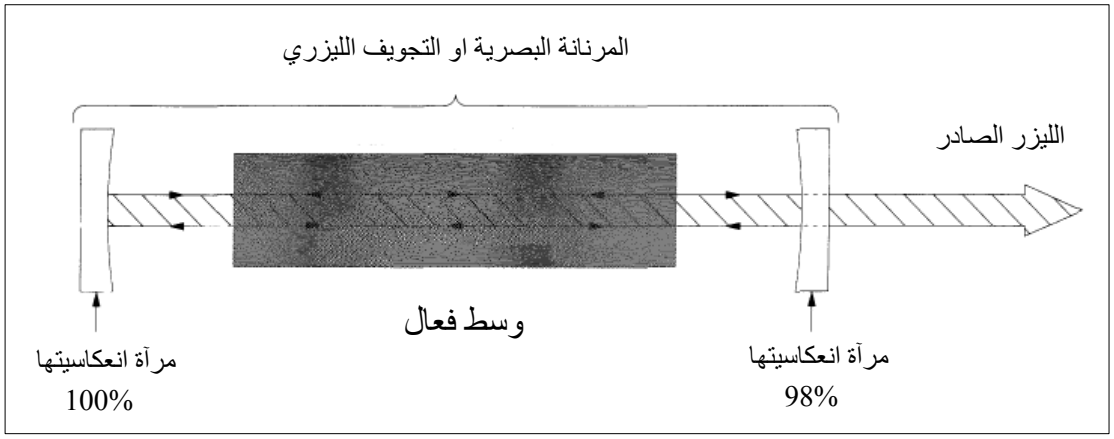
5.3 الوسط الليزري (المادة الفعالة):

تم اعتبار الليزر السائل والغاز كمرشحين لليزر الشمسي [8،9، 90]. ومع ذلك فقد تقاربت أبحاث الليزر الشمسي بشكل أساسي في الأنظمة ذات الحالة الصلبة، خاصة Nd: YAG و .Cr: Nd: YAG في أنظمة الليزر Nd: YAG الأولى التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية، عرفت الخصائص المواتية لأحداث الفعل الليزري لأيون النيوديميوم بشكل استثنائي في مرحلة مبكرة، في البحث عن مواد صلبة ليزرية، فأيون النيوديميوم Nd^{3+} يبدي مدى حياة تفلورية طويلة، و ضيق في اتساع الخطوط التفلورية في البلورات مع بنية منتظمة، يمتلك مستوى حدي للانتقالات الليزرية عالية بما فيه الكفاية فوق المستوى الارضي لذى كان تشغيله بالنمط cw ممكن و بسهولة حتى في درجة حرارة الغرفة، لذلك تم دمج هذا الايون كمطعم في مجموعة متنوعة من المواد المستضيفة وهي: الزجاج، $CaWO_4$، $CaMoO_4$، CaF_2، LaF_3، في محاولة للاستفادة من امكاناته العظيمة، ومع ذلك فإن معظم هؤلاء المضيفات ابدت اوجه قصور غير مرغوب فيها بشكل مبكر، اما من جهة خواصها الفيزيائية الجوهرية او بسبب طريقة تفاعلها مع الايون، اخيرا تم اكتشاف عقيق الالمنيوم يتريوم YAG من قبل Geusic و من معه كمضيف و تم شرح مدى تفوقه على المواد المضيفة الاخرى .

على وجه الخصوص حقق YAG مكانة مهيمنة وسط المواد الليزرية للحالة الصلبة، حيث يتميز بشدة صلابته و بلورته متماثلة المناحي، و التي يمكن ان تنمو و تصنع بطريقة تولد قضبان عالية الجودة البصرية، في الوقت الحالي تعتبر افضل بلورة مستضيفة تجارية متوفرة لـNd^{3+}، و التي توفر عتبة منخفضة و ربح مرتفع[4].

6.3 مرنانة الليزر او التجويف الليزري:

إن عملية التذبذب الفوتوني (Photonic oscillation) تتطلب وجود تغذية عكسية (Feedback) لإدامة التذبذب. وإن التغذية العكسية في منظومة الليزر تتم باستخدام تجويف بصري يسمى المرنان **الصورة. 43.3** ويتألف من مرآتين تنتقل بينهما الفوتونات المتولدة ذهاباً وإياباً على طول المحور البصري(Resonator) للتجويف.



الصورة. 1.3 رسم تخطيطي لمرنانة الليزر[55].

4. طرق ضخ الليزر الشمسي:

لقد تم التطرق الى عملية الضخ في الليزرات في الفقرة 7.3 من الفصل الاول. و عرفناها على انها عملية يتم فيها رفع الذرات من السوية 1 الى السوية 3 (في حالة ليزر ذي ثلاثة سويات) او من السوية 0 الى السوية 3 (في حالة ليزر اربع سويات). و تتم هذه العمليات بإحدى الطرق التالية:

إما ضوئيا أو كهربائيا او كيميائيا او ضخ الديناميكا الغازي. و عرفنا ان الضخ الضوئي مناسبة بصورة خاصة في ليزرات الحالة الصلبة. و عندما يكون مصدر الضخ هو الشمس يسمى الليزر بالليزر الشمسي و يسمى الضخ بالضخ الشمسي.

1.4 الضخ غير المباشر:

في الضخ الشمسي غير المباشر، يضيء الإشعاع الشمسي الخلايا الشمسية لإنتاج الكهرباء، التي تشغل ليزرات الصمام الثنائي. و من اهم مشاكل طريقة الضخ غير المباشر خاصة في التطبيقات الفضائية لليزر الشمسي، و الذي يتمثل في أحد أوجه القصور المهمة في مصفوفات أشباه الموصلات التي هي محدودية عمرها الافتراضي وتدهور الأداء بمرور الوقت، والذي يبدو أنه يتناسب مع مستوى متوسط طاقة الليزر الصادرة. بالنسبة لأنظمة الليزر عالية الطاقة، يعد عمر هذه الأجهزة أحد العوامل الرئيسية التي تحد من عمر نظام الليزر أو حتى النظام بأكمله لمدة 3 سنوات تقريبا [80].

2.4 الضخ المباشر:

يمكن ضخ الليزرات بشكل مباشر بضوء الشمس. و يتم ذلك عن طريق وضع رأس الليزر، والذي يحتوي على الوسط الفعال. في البقعة البؤرية لمركز شمسي اولي. لان ضوء الشمس المباشر لا يوفر تدفقا كافيا لأحداث الفعل الليزري. إن الضخ المباشر بالطاقة الشمسية يوفر خطوتين لتحويل الطاقة، وبالتالي فهو بطبيعته أكثر كفاءة، وأبسط بكثير وأكثر موثوقية. إن تجنب صفائف ليزر أشباه الموصلات تمامًا عن طريق الضخ الشمسي المباشر لليزر الحالة الصلبة يظهر إمكانية التغلب على القيود الحالية، مما يتيح عملية ليزر موثوقة محمولة في الفضاء على مدى عدة سنوات.

3.4 مقارنة بين طرق ضخ الليزر الشمسي:

نقارن في الجدول 1.3 بين طريقتي ضخ الليزر الشمسي، حيث تم توضيح ايجابيات و سلبيات كل طريقة .

الجدول 1.3 - مقارنة بين انواع الليزرات.

نوع الليزر		الايجابيات	السلبيات
الليزر المضخ بالمصابيح		❖ اوقات التشغيل لا تتعلق بالطقس واليوم والفصل (صيف- شتاء...).	❖ مكلف. ❖ يتطلب عدة مراحل.
الليزر المضخ بالصمام الثنائي.		❖ بسيط. ❖ اوقات التشغيل لا تتعلق بالطقس واليوم والفصل (صيف- شتاء...). ❖ كفاءة عالية.	❖ مكلف. ❖ يتطلب عدة مراحل.
الليزر المضخ بضوء الشمس	الضخ غير المباشر	❖ يتكون من اجزاء قياسية.	❖ غالي جدا ❖ كفاءة منخفضة. ❖ اوقات التشغيل تتعلق بالطقس واليوم والفصل (صيف- شتاء...). ❖ يتطلب عدة مراحل
	الضخ المباشر	❖ البناء من المكونات القياسية. ❖ عملية من خطوة واحدة. ❖ متوسط الكفاءة. ❖ تكلفة معقولة.	❖ يتطلب نظام الليزر التتبع الشمسي. ❖ اوقات التشغيل تتعلق بالطقس واليوم والفصل (صيف- شتاء...). ❖ تصميم المعقد للنظام البصري.

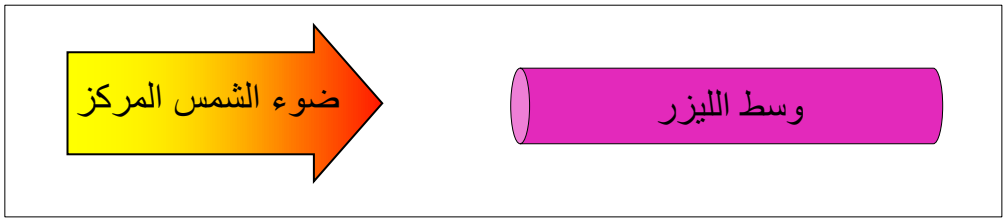
4.4 طرق الضخ المباشر لليزر الشمسي:

ان المتتبع لمراحل تطور الليزر الشمسي التي سيتم ذكرها في الفقرة 5 من هذا الفصل. يلاحظ ان طرق ضخ الليزر الشمسي اقتصرت على طريقتين هما:

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

1.4.4 الضخ الطرفي-الجانبي:

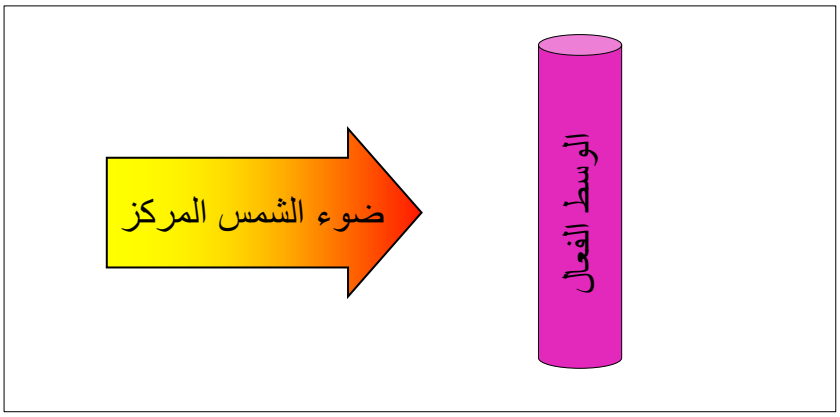
في هذه الحالة يتم تتوجيه ضوء الشمس المركز نحو احد اطراف وسط الليزر الاسطواني. الذي يكون مقترنا بفتحة اخراج لمركز ثاني قد يكون دليل ضوئي من السيليكا او عدسة كروية او شبه كروية او الياف بصرية مرآة مخروطية او من نوع 3D-CPC. توضح **الصورة. 44.3** تصميمًا تخطيطيًا لنظام توليد الليزر الشمسي باستخدام تقنية الضخ الطرفي-الجانبي.



الصورة. 2.3 رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الطرفي-الجانبي لليزر الشمسي.

2.4.4 الضخ الجانبي:

في طريقة الضخ الجانبي، يتم توزيع ضوء الشمس المركز على السطح الجانبية لوسط الليزر اسطواني الشكل. بالإضافة إلى المركز الأولي، يتم استخدام مركز ثاني من النوع 2D-CPC أو تجويف بصري بأشكال 2V او مرآة مخروطية ...الخ مختلفة لتوزيع ضوء الشمس بشكل موحد على طول قضيب الليزر. توضح **الصورة. 45.3** تصميمًا تخطيطيًا لنظام توليد ليزر شمسي باستخدام تقنية الضخ الجانبي.



الصورة. 3.3 رسم تخطيطي لمبدأ الضخ الجانبي لليزر الشمسي.

5. اهم التطورات التاريخية لليزر الشمسي (STATE-OF-THE-ART):

ظهرت فكرة الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (الليزر الشمسي) بعد فترة قصيرة من اختراع الليزر[5]. تم البرهان عن الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية في عام 1963 بواسطة كيس ومن معه[91]. باستخدام بلورة فلوريد الكالسيوم (CaF_2) مطعم مع الديسبروسيوم ثنائي التكافؤ (Dy^{2+} : CaF_2) عند درجة حرارة نيون سائل (Ne) [6]. بعد ذلك بوقت قصير، في عام 1966 أبلغ يونغ (Young) عن اول ليزر شمسي لـ Nd :YAG و الذي اعطى 1W ليزر موجي مستمر cw [7]، استمرت التطورات في المواد البصرية والليزرية في تحسين أداء الليزر الشمسي و ذلك بتحسين اهم متغيراته التي هي:

طاقة الليزر الشمسي: و تعطى بوحدة الواط (W).

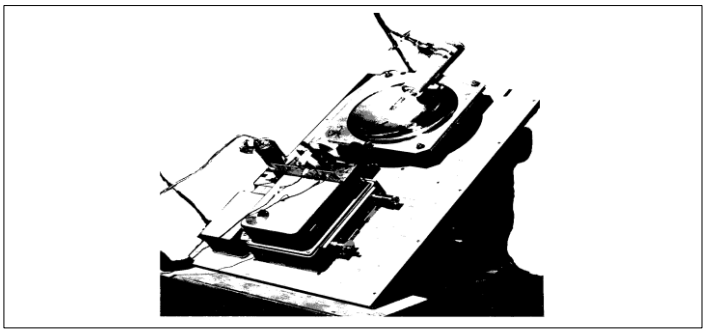
كفاءة التجميع (The solar laser collection efficiency) : و تعرف على انها طاقة الليزر المنبعثة لكل وحدة مساحة من المركز الاولي، وهي تعبر عن كفاءة منظومة الليزر و تعطى بوحدة (w/m^2)[14]. اي انها النسبة بين طاقة الليزر الناتج و مساحة فتحة المركز الاولي.

لمعان حزمة الليزر الشمسي (The solar laser beam brightness): و يعطى بحساب النسبة بين طاقة الليزر الصادر و جداء عوامل جودة الشعاع M_x^2 و M_Y^2 بالنسبة لحزمة غير متناظرة، و على مربع M^2 بالنسبة لحزمة ليزر متناظرة. وتعطى بوحدة الواط (w)[15].

نسرد في ما يلي اهم الابحاث التي ساهمت في تطور تقنية الليزر الشمسي. حيث تم تصنيفها حسبها اطارها الزمني (1963- 2021). كما اشرنا الى المؤلفين (الناشرين) و كذلك طريقة الضخ. اشرنا ايضا الى الهدف من البحث و الوسائل المستعمل و النتائج المتحصل عليها.

- أول ليزر ذو حالة صلبة يتم ضخه بالطاقة الشمسية:

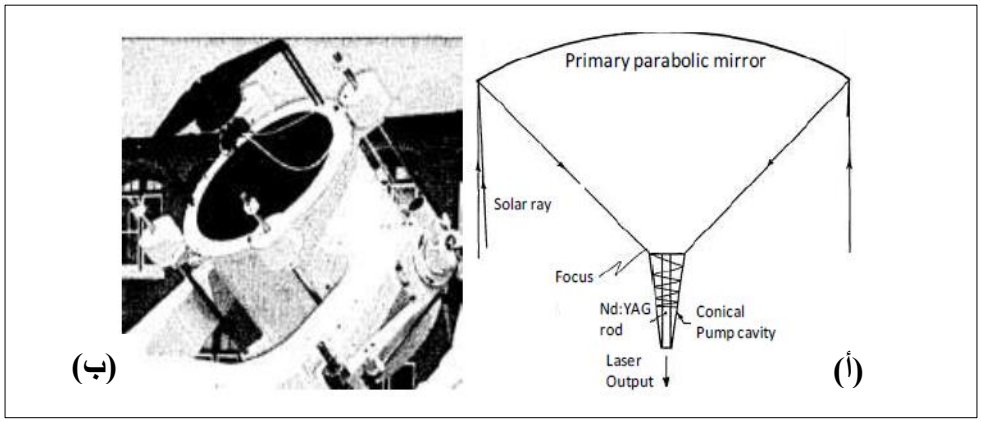
في سنة 1963 ابلغ Kiss و من معه عن أول ليزر الحالة الصلبة الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية، عن طريق الضخ الجانبي و باستخدام بلورة CaF^2 المطعمة Dy^{2+} مع نيون السائل بواسطة مرآة كروية بفتحة 14 بوصة. تم تسجيل عمل الليزر عند 2.36µm[6].



الصورة. 4.3 صورة للتركيب التجريبي تظهر السائل النيون في وعاء ديور و مرآة كروية 14 بوصة[6].

- أول ليزر cw Nd: YAG بطاقة 1W يتم ضخه بالطاقة الشمسية:

في سنة 1966 اعلن Young C. G عن أول ليزر Nd: YAG يتم ضخه بالطاقة الشمسية، تم الحصول على 1 واط من ليزر cw بطريقة الضخ الطرفي الجانبي لوسط ليزر من Nd: YAG في درجة حرارة الغرفة باستخدام تلسكوب (Cassegrain Suntracking) معدل يتكون من مركز أولي مرآة مكافئ قطرها 61 سم[7].



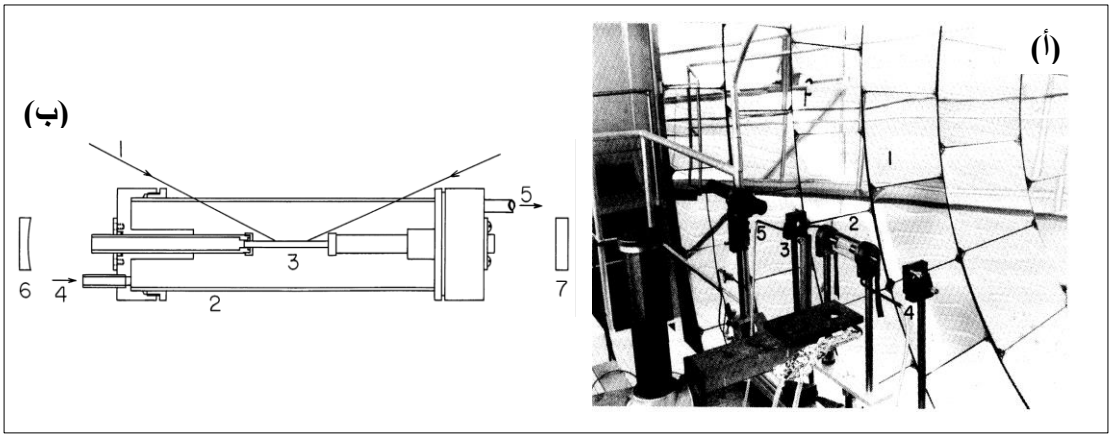
الصورة. 5.3 (أ) رسم تخطيطي لتصميم الضخ الطرفي (ب) صورة فوتوغرافية لمتتبع شمسي وضعت عليه مرأة كروية بقطر 61cm[7].

- أول مفهوم ليزر سائل يتم ضخه بالطاقة الشمسية :

في سنة 1983 كان هدف Schneider و من معه تطوير ليزر سائل مضخوخا بضوء الشمس. باستخدام ضخ فلاش Xenon لمحاكاة الإشعاع الشمسي الذي يوفره المركز الشمسي، تم تحقيق ليزر الفوسفور السائل $POCl_3$: Nd^{3+}: $ZrCl_4$. كانت طاقة خرج الليزر المقدرة حوالي 2 J [8].

- 18W طاقة الليزر الشمسي النبضي المستمر بوسط ليزر من Nd: YAG :

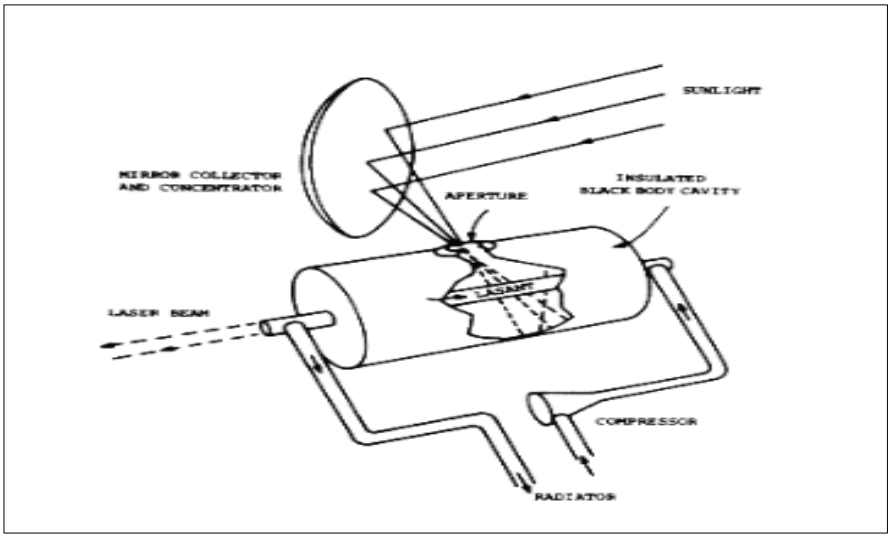
بعد عمل يونغ كان هناك تقدم ضئيل في مجال أبحاث ليزر الحالة الصلبة التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية حتى عام 1984. اين ابلغ Arashi عن 18w ليزرcw، من خلال تركيب وسط ليزر أحادي البلورة بقطر 4mm وطول 75mm من Nd: YAG داخل أنبوب تدفق مبرد بالماء بقطر 50mm، باستخدام مرآة مكافئة مساحتها m^2 78.5. عن طريق الضخ الجانبي تم تحقيق كفاءة تجميع الليزر الشمسي $0.23w/m^2$ فقط في هذه الحالة[22].



الصورة. 6.3 (أ) رأس الليزر موضوع في بؤرة مرآة مكافئة (ب) مخطط لرأس الليزر[22].

- أول ليزر ثاني أكسيد الكربون يضخ بالطاقة الشمسية للجسم الأسود:

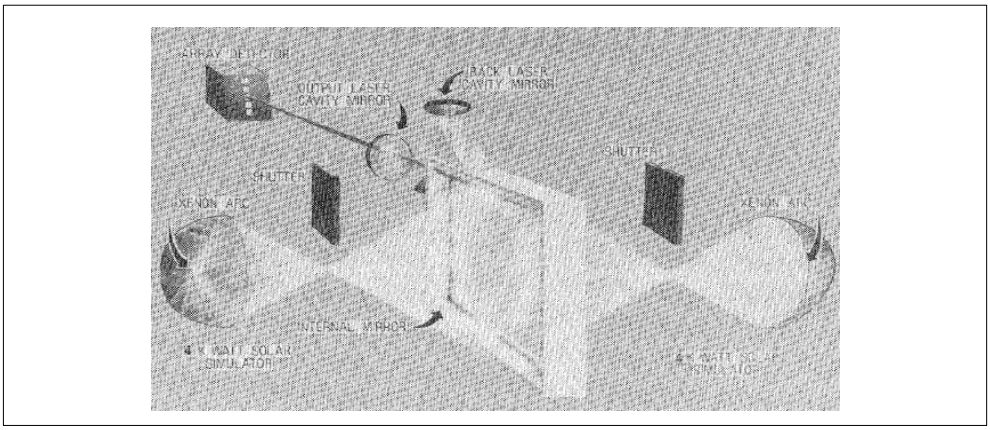
فكر Walter H. Christiansen سنة 1984 في استخدام ضوء الشمس لتسخين الجسم الأسود، والذي سيبدأ في إصدار إشعاع حراري بالأشعة تحت الحمراء، ويمكن بعد ذلك وضع أنبوب الليزر داخل تجويف الجسم الأسود. سيسمح هذا المخطط للتدفق الشمسي بأكمله بالمساهمة في عملية الليزر بسبب الديناميكا الحرارية لتجويف الجسم الأسود. لإثبات هذا المفهوم، استخدموا فرنًا مسخنًا كهربائيًا لمحاكاة تجويف الجسم الأسود المسخن بالطاقة الشمسية، والحصول على طاقة خرج ليزر تبلغ حوالي 4.5mW[90].



الصورة. 7.3 مخطط الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية عبر تجويف الجسم الأسود[90].

- أول ليزر يود محاكى بالطاقة الشمسية:

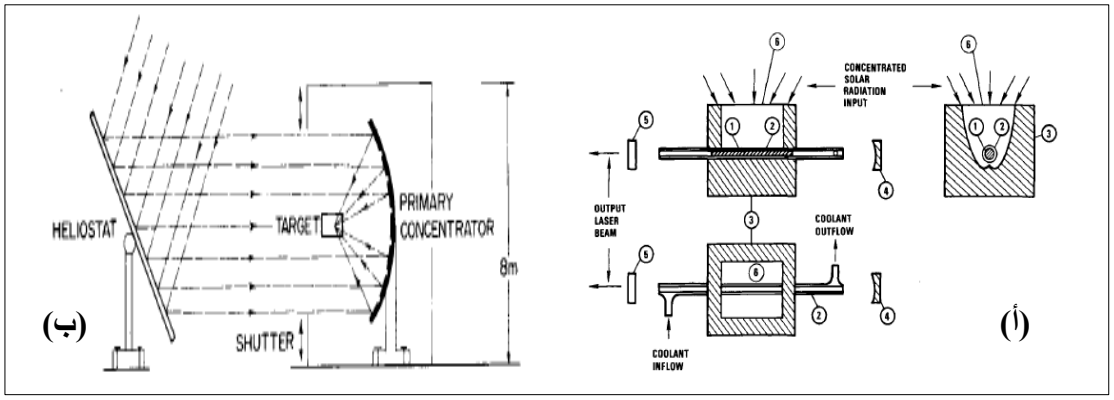
في سنة 1986 تحصل DeYoung و Weaver على الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية من يوديد البيرفلوروبوتيل ($n\text{-}C_4F_9I$)[92] و خماسي يوديد فلورو إيثيل (C_2F_5I)[9]، حيث تقترب عتبة الليزر من 100 من الثابت الشمسية ($135Kw/m^2$ عند AM0)، عن طريق محاكاة طيف ضوء الشمس مع اثنين من أجهزة قوس زينون محاكاة الطاقة الشمسية. تم قياس قوة الليزر 525mW[92]و 350mW[9]، على التوالي.



الصورة. 8.3 تمثيل تخطيطي للتركيب التجريبي. توفر محاكيتان للطاقة الشمسية على شكل قوس زينون مدخلات بصرية في تجويف الصندوق الليزري الذي يحتوي على غاز الليزر[42].

- 60W طاقة الليزر الشمسي النبضي المستمر (cw) لوسط ليزر من Nd: YAG:

في سنة 1988 تحصل Weksler و Shwartz على طاقة ليزر cw ثابتة 60W بكفاءة انحدار تتجاوز 2% مع ضخ شمسي مباشر من لوسط ليزر Nd: YAG من خلال مركز مركب مكافئ (CPC)، والذي تم تصميمه لزيادة الإشعاع الشمسي المقترن بوسط الليزر[21].

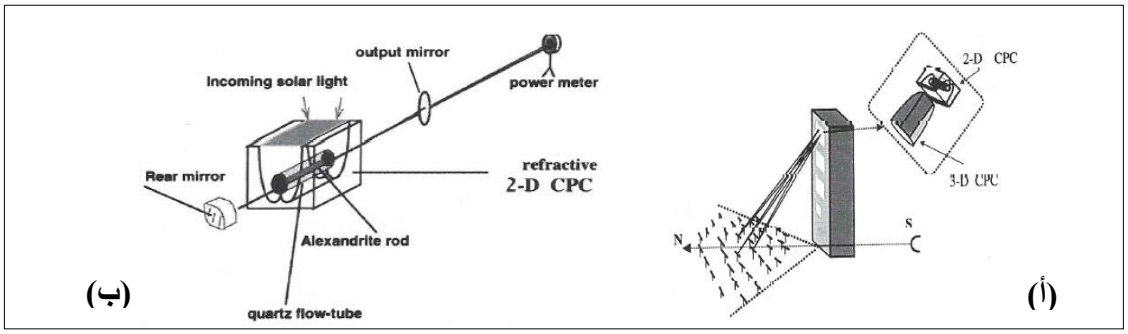


الصورة. 9.3 (أ) ثلاثة مقاطع عرضية لرأس الليزر والمرنانة (ب) مخطط الفرن الشمسي لـ WIS[21].

- $4.7W/m^2$ كفاءة تجميع الليزر الشمسي لوسط ليزر من Nd: YAG:

في أنظمة الليزر Nd: YAG الأولى التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية، كان هناك ميل لزيادة طاقة الليزر. ومع ذلك كانت كفاءة التجميع منخفضة للغاية، مع $1.56W/m^2$ فقط بالنسبة لأعلى طاقة ليزر تبلغ 60W[21]. فيما يتعلق بهذه المشكلة و في سنة 1996 Jenkins, D ومن معه، صمموا ليزر Nd: YAG الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية بكفاءة تجميع $4.7W/m^2$. تم ضخ الليزر وضع شبه جانبي بواسطة الفرن الشمسي عالي التدفق (HFSF) في المختبر الوطني للطاقة المتجددة[14].

- ليزر الحالة الصلبة المرئي الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية:



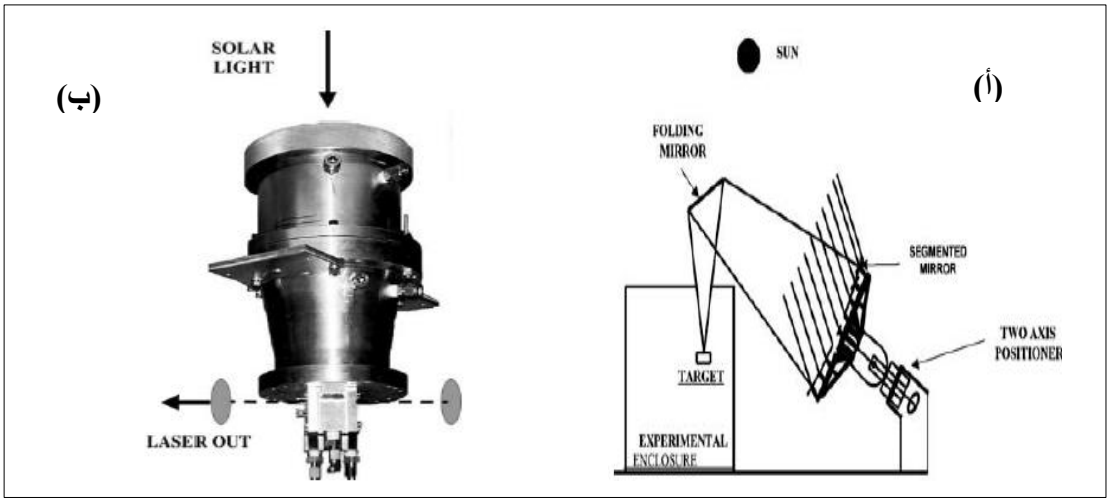
الصورة. 10.3 (أ) رسم توضيحي تخطيطي لنظام التركيز الشمسي مع 12 عمودًا متتبع شمسي موجهًا إلى الطابق الثاني عشر من البرج الشمسي كمركز اولي (ب) رسم تخطيطي لرأس الليزر و مرنانة ليزر ألكسندريت[48].

في سنة 1999 إبلاغ Lando ومن معه عن اثنين من الليزر المرئي الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية: ليزر ألكسندريت أحمر مع نطاق ضبط محتمل بين 700nm و 818nm، و Nd: YAG مضاعف التردد يعمل عند 532nm. تم الحصول على طاقة ليزر بالضخ الجانبي تصل إلى 12W من ليزر الكسندريت. بالنسبة Nd:

YAG للجيل التوافقي الثاني، تم تحقيق طاقات ليزر 4.1W و 8.7W على التوالي من خلال تبديل Q-switching السلبي و الايجابي[48].

- 6.7W/m^2 ليزر شمسي بالضخ الجانبي لوسط ليزر من Nd: YAG :

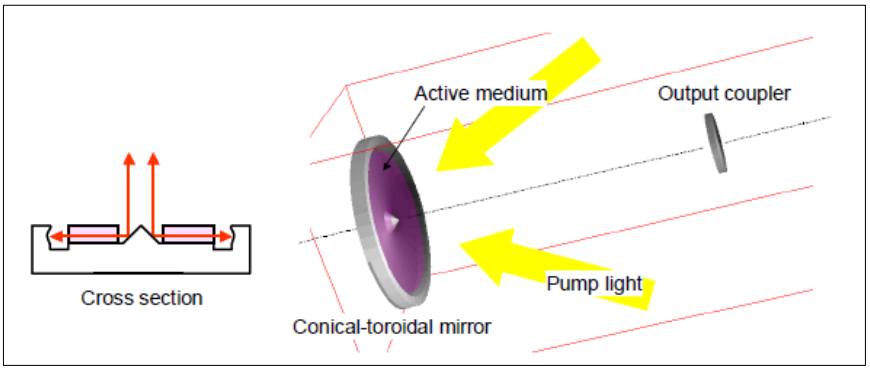
في سنة 2003 تمكن Lando و من معه من تحسين كفاءة تجميع الليزر الشمسي Nd: YAG إلى 6.7W/m^2 بالضخ الجانبي باستخدام مرآة أولية مجزأة بمساحة 6.75m^2 مثبتة في وضع التتبع المباشر و 3D-CPC مقترن مع 2D-CPC. تم الإبلاغ أيضًا عن دراسة شاملة لجودة شعاع الليزر، مما أدى إلى تحقيق معدل سطوع قدره 0.032W[15].



الصورة. 11.3 (أ) رسم توضيحي تخطيطي لنظام التركيز الشمسي (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[15].

- دراسة مرنان المرآة المخروطية الحلقيّة لأجهزة الليزر ذات القرص الرقيق التي تُضخّ بالطاقة الشمسية:

في سنة 2007 اقتراح M. Endo و من معه مرنان مرآة مخروطي حلقي مدمج مع قرص رفيع (Nd / Cr-codoped GSGG). على عكس ليزر القرص الرقيق التقليدي، فإن مسار الأشعة الضوئية داخل الوسائط له اتجاه شعاعي موازٍ لوجه القرص، وهو مناسب للضخ الشمسي[93]



الصورة. 12.3 رسم تخطيطي لمرنانة بعاكس حلقي مخروطي وقرص رفيع[93].

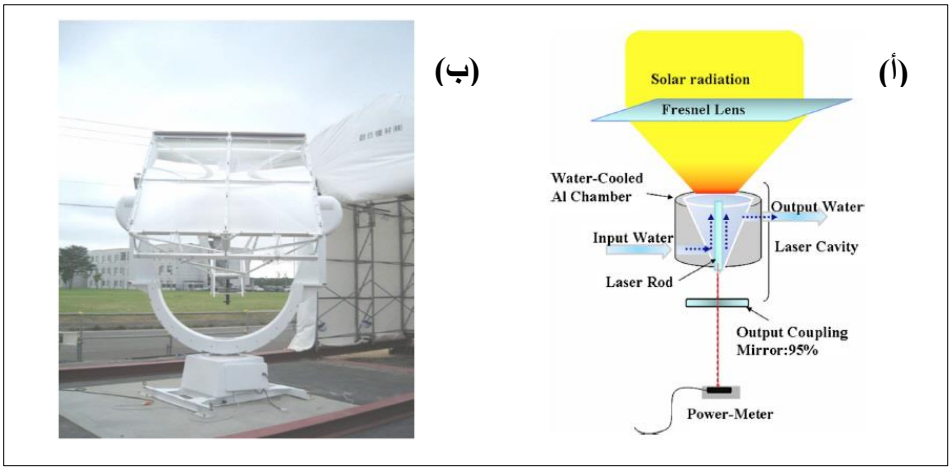
- $18.7W/m^2$ كفاءة تجميع الليزر الشمسي Cr: Nd: YAG مع عدسة Fresnel:

بالرغم من دراسة المرايا المكافئة لتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي، إلا أن اعتماد عدسة فرينل كمركز أول للطاقة الشمسية في عام 2007 بواسطة Yabe و من معه عزز بشكل كبير كفاءة تجميع الليزر الشمسي إلى $18.7W/m^2$ بالضخ الطرفي-الجانبي. وقد أدى ذلك إلى تنشيط باحثي الليزر الشمسي، وكشف عن مستقبل واعد للاسترجاع المتجدد Mg من MgO. كانت أيضًا المرة الأولى التي يتم فيها اختبار ليزر Cr: Nd: YAG لتحسين كفاءته نظرًا لامتصاص طيف ضوء الشمس المناسب مقارنةً بـ .Nd: YAG[16].

الصورة. 13.3 نظام تجريبي لليزر من ضوء الشمس الطبيعي. مكون من عدستي فرينل[16].

- ليزر شمسي من رتبة 100W لدورة طاقة هيدروجين المغنيسيوم المستدامة:

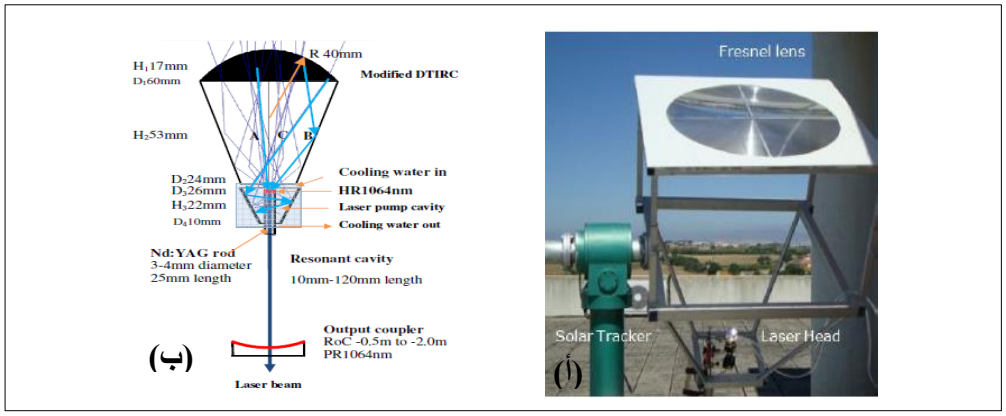
في سنة 2008 تمكن Yabe و من معه من تطوير نظام ليزر يتم ضخه بالطاقة الشمسية بكفاءات انحدار تتراوح من 7% إلى 9%. بعدسة فرينل مساحتها $4m^2$ تركز الإشعاع الشمسي باتجاه تجويف الليزر، الذي يحتوي على قضيب من Cr: Nd: YAG. الحد الأقصى لطاقة الليزر المنبعثة هو 80W بكفاءة تجميع $20W/m^2$. تم تحقيق 4.3% صافي كفاءة التحويل[94].



الصورة. 14.3 (أ) رسم تخطيطي لمنظومة الليزر الشمسي، (ب) صورة لمنظومة الليزر الشمسي[94].

- $19.3W/m^2$ كفاءة تجميع الليزر الشمسي Nd: YAG مع عدسة Fresnel:

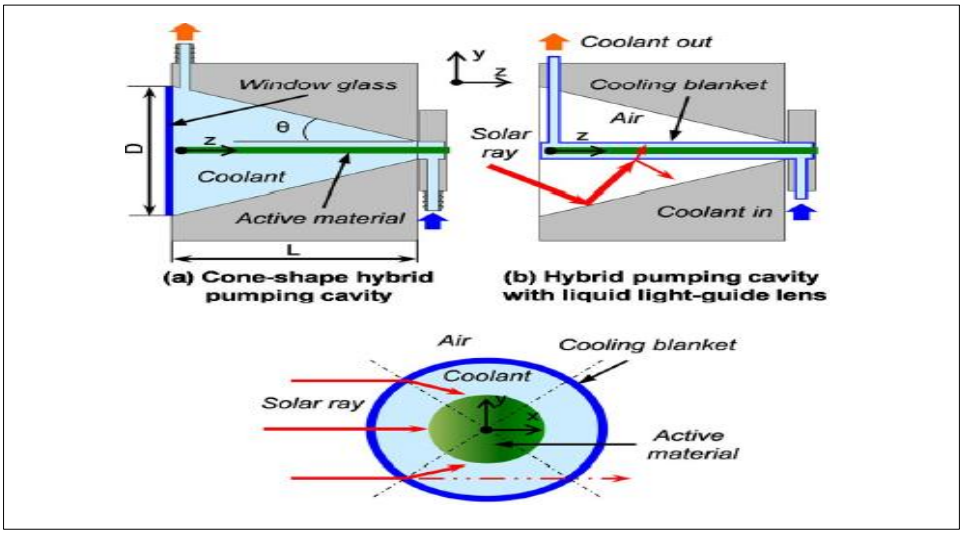
تمكن Liang و Almeida في سنة 2011 من تحقيق كفاءة تجميع الليزر الشمسي $19.3W/m^2$ بالضخ من الطرف لوسط ليزر أحادي البلورة بقطر 4mm وطول Nd: YAG 25mm من خلال عدسة Fresnel بمساحة 0.64 م 2. تم تحقيق تحسينات كبيرة في جودة شعاع الليزر، تم تحقيق لمعان قدره 0.086W[17].



الصورة. 15.3 (أ) نظام الليزر الشمسي مع عدسة فرينل قطرها 0.9 متر ورأس ليزر موضوع في منطقتها البؤرية. (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[17].

- رقم قياسي $30W/m^2$ في كفاءة التجميع ليزر شمسي Nd: YAG مع عدسة فريسنل:

في سنة 2012 حقق Dinh و من معه كفاءة تجميع قياسية تبلغ $30.0W/m^2$ عن طريق ضخ من الطرف لوسط ليزر أحادي البلورة Nd: YAG بقطر 6mm وطول 100mm من خلال عدسة فرينل بمساحة $4m^2$[18].

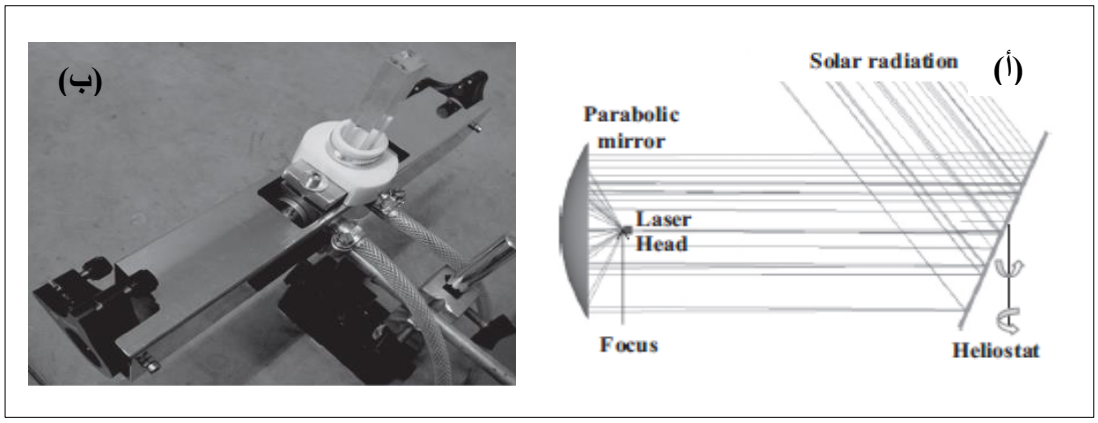


الصورة. 16.3 رسم تخطيطي لرأس الليزر وعدسة الدليل الضوئي المائية[18].

- 0.29W سطوع شعاع الليزر الشمسي:

في نفس السنة Almeida و من معها حققوا تحسنًا كبيرًا في سطوع شعاع الليزر عن طريق الضخ الجانبي باستخدام مرآة قطعية مكافئة، لوسط ليزر بقطر 4mm وطول 30mm من Nd: YAG أحادي البلورة. تم تحقيق

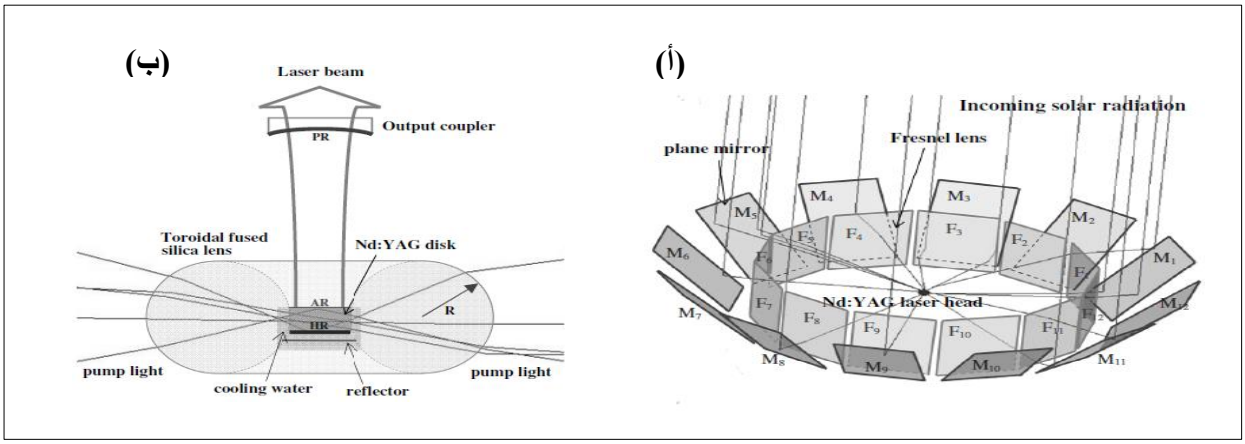
رقم سطوع قدره 0.29W، وهو 3.4 مرات أعلى من الرقم القياسي السابق. أيضًا تم تسجيل كفاءة تجميع الليزر الشمسي بمقدار $9.6W/m^2$[23].



الصورة 17.3 (أ) نظام التركيز الاولي لليزر الشمسي بمرآة قطعية مكافئة (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[23].

- مفهوم جديد لليزر القرص الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية:

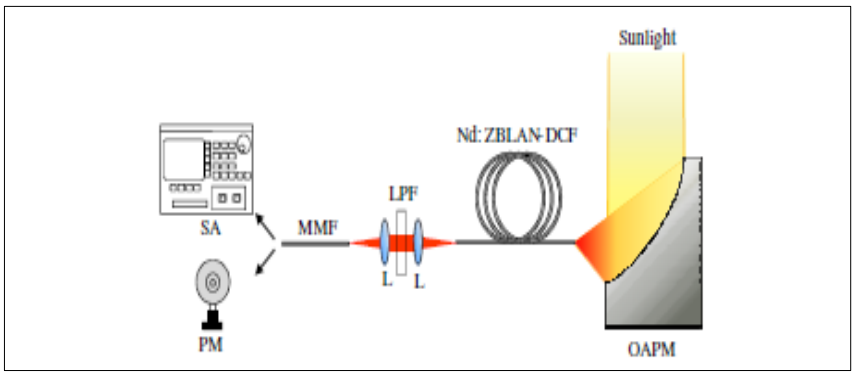
تم اقترح فكرة جديدة لتطبيق تقنية ليزر القرص الرقيق في سنة 2012 من قبل Liang و Almeida ، التي تم تطويرها في البداية لأنظمة الليزر التي يتم ضخها بواسطة الصمام الثنائي، إلى الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية، من خلال عدسات فرينل. يتم استخدام مخطط متعدد الضخ الجانبي لقرص Nd: YAG أحادي البلورة[24].



الصورة. 18.3 (أ) مخطط مرايا مستوية متعددة - عدسة فرينل لليزر القرص الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[24].

- أول ليزر ليفي يضخ بالطاقة الشمسية:

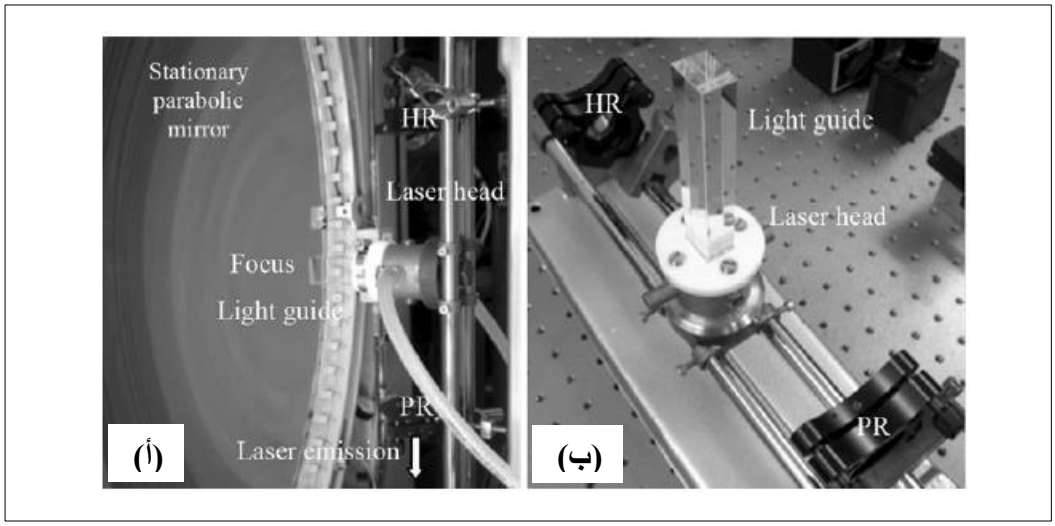
حقق Mizuno في سنة 2012 و من معه ليزر الألياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية باستخدام ألياف ضوئية Nd-doped فلوريد كوسط ليزر تم قياس 0.57mW، مما أدى إلى $0.3W/m^2$ فقط[25].



الصورة. 19.3 التركيب التخطيطي لتجربة ليزر الألياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية[25].

- أول ضخ جانبي Cr: Nd: YAG ليزر شمسي:

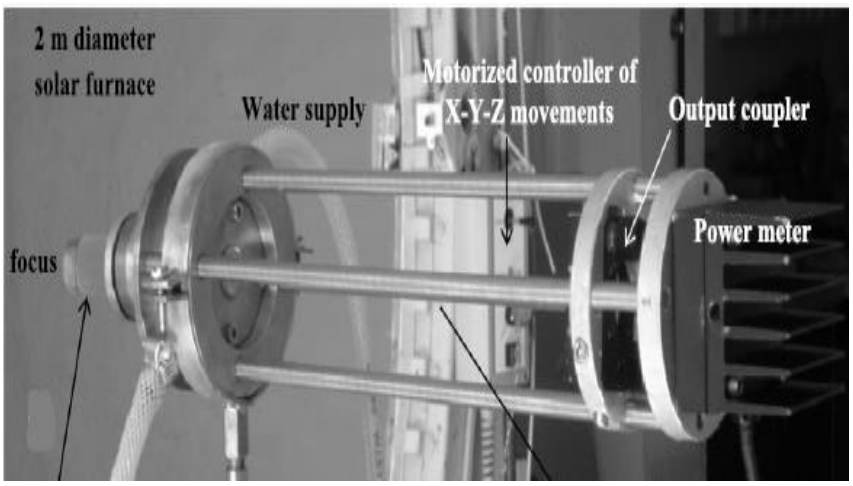
أول ضخ جانبي شمسي ليزر Cr: Nd: YAG سنة 2013 من طرف Liang و من معه باستخدام مرآة قطعية مكافئة لتوضيح مزايا قضبان السيراميك، وسط ليزر يبلغ قطره 7mm تم تحقيق قوة ليزر 33.6W cw ليزر و 2.6% من كفاءة الانحدار[26].



الصورة. 20.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بمرآة مكافئة لمركز MSSF (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[26].

- $13.9W/m^2$ كفاءة تجميع الليزر الشمسي Nd: YAG مع نظام المرآة المكافئ:

في نفس السنة تمكنت Almeida و من معها من تحقيق تحسين كبير في كفاءة التجميع الليزر الشمسي من خلال نظام المرآة - مكافئ، عن طريق ضخ من الطرف لوسط ليزر احادي البلورة Nd: YAG. تم قياس قدرة الليزر 40W، مما أدى إلى كفاءة تجميع تبلغ $13.9W/m^2$ وكفاءة انحدار بنسبة 2.9%[27].



الصورة. 21.3 صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر موضوعة في بؤرة مرآة قطعية مكافئة[27].

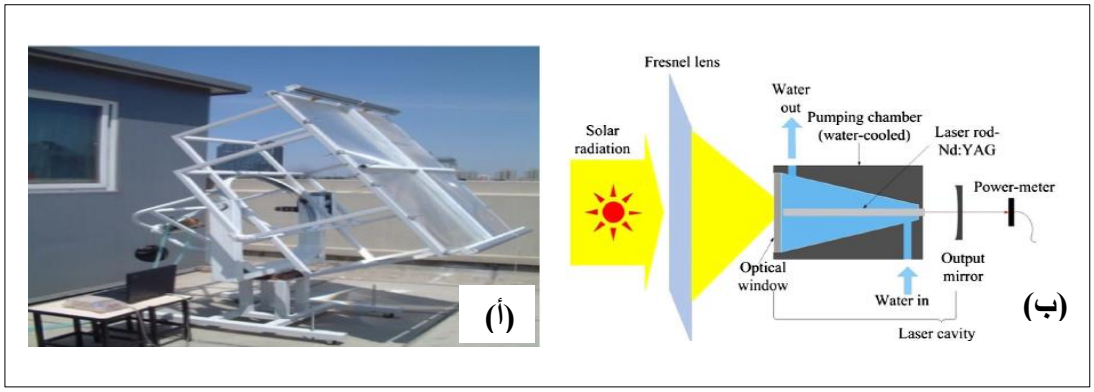
- أول ليزر شمسي بـ 1.9W سطوع من نمط TEM_{00}:

ايضا في سنة 2013 حقق Liang و Almeida تقدم كبير في سطوع شعاع الليزر الشمسي باستخدام عدسة فرينل بنمط TEM_{00}. حيث تم إنتاج 2.3W من طاقة الليزر الشمسية ذات الموجة المستمرة والتي تقابل 1.9W سطوع شعاع الليزر، وكفاءة تجميع $2.93W/m^2$ عن طريق الضخ الجانبي[28].

الصورة. 22.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بعدسة فرينل (ب) صورة لمنظومة التركيز الثانية و مرنانة الليزر[28].

- 20.3W ليزر cw عن طريق الضخ الطرفي لقضيب من Nd: YAG محزز مع عدسة Fresnel:

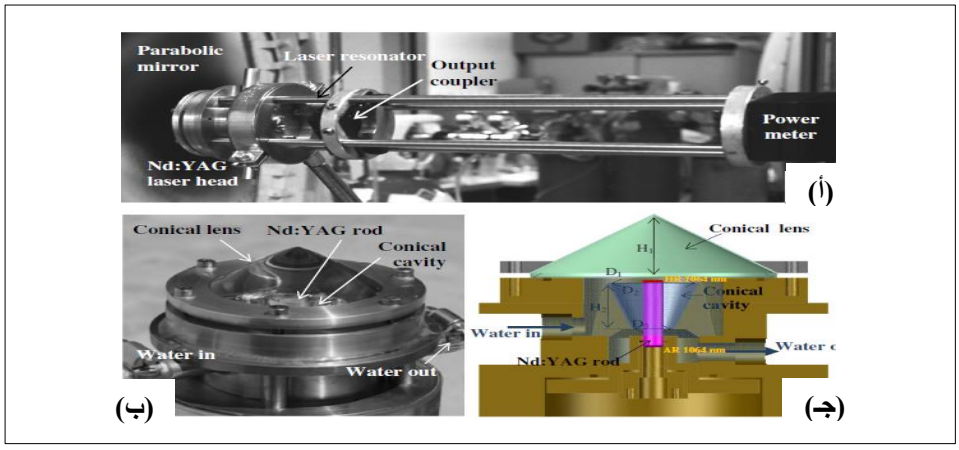
حقق Xu في سنة 2014 و من معه 20.3W ليزر cw بالضخ الطرفي الجانبي باستخدام عدسة فرينل لوسط ليزر Nd: YAG بجدار جانبي محزز لأول مرة في مخطط ليزر يضخ بالطاقة الشمسية. تم تحسين الكفاءة وجودة الحزمة نسبيًا للقضبان غير المصقولة. كان الحد الأقصى لطاقة الليزر من القضيب المحزز أعلى بنسبة تزيد عن 50%[31].



الصورة. 23.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بعدسة فرينل (ب) مخطط لمنظومة التركيز الاولية والثانية و مرنانة الليزر[31].

- 21.1W/m^2 كفاءة تجميع الليزر الشمسي مع مركز المرآة المكافئة:

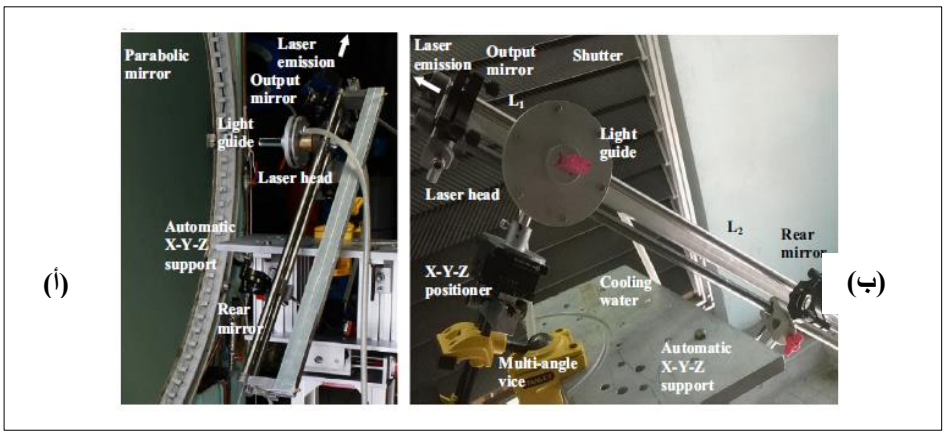
حققت Almeida في سنة 2015 و من معها تحسن كبير في كل من كفاءات التجميع والمنحدرات عن طريق الضخ الطرفي الجانبي لليزر الشمسي لوسط ليزر من Nd: YAG باستخدام المرآة المكافئة، تم قياس قوة ليزر بقدرة 56W، وهو ما يقابل 21.1W/m^2 كفاءة التجميع. كما تم حساب 4.9% من كفاءة الانحدار[32].



الصورة. 24.3 (أ) صورة لرأس ليزر Nd: YAG موضوع في بؤرة مرآة قطعية مكافئة. (ب) صورة التصميم الميكانيكي لرأس الليزر Nd: YAG، المكون من عدسة مخروطية من السيليكا وتجويف الضخ المخروطي (ج) مخطط التصميم الميكانيكي لرأس الليزر[32].

- 4.0W سطوع الليزر الشمسي:

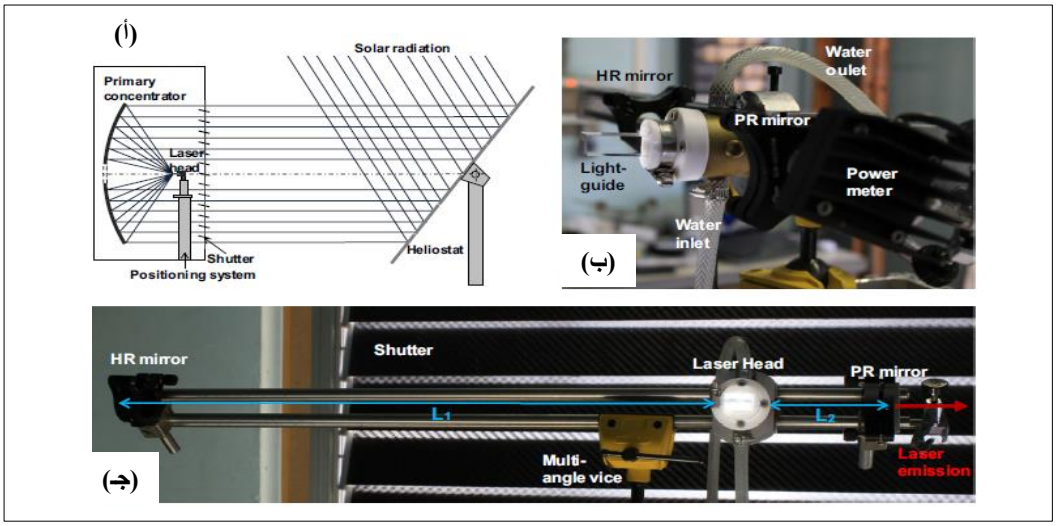
تحسن كبير في سطوع شعاع الليزر الشمسي تم تحقيقه في نفس السنة، عن طريق الضخ الجانبي لوسط ليزر أحادي البلورة Nd: YAG بقطر 3mm باستخدام مرآة مكافئة من طرف Liang و من معه. اين تم إنتاج 4.4W ليزر cw في الوضع TEM_{00}، محققةً سطوع شعاع 4.0W، والتي كانت أعلى 2.1 مرة من السجل السابق المحقق بعدسة فرينل[33].



الصورة. 25.3 (أ) صورة لمنظومة التركيز الاولية بمرآة مكافئة لمركز MSSF (ب) صورة لرأس الليزر موضوع في بؤرة المرآة[33].

- ليزر نبضي مستمر ذات النمط TEM_{00} بطاقة 5.5W:

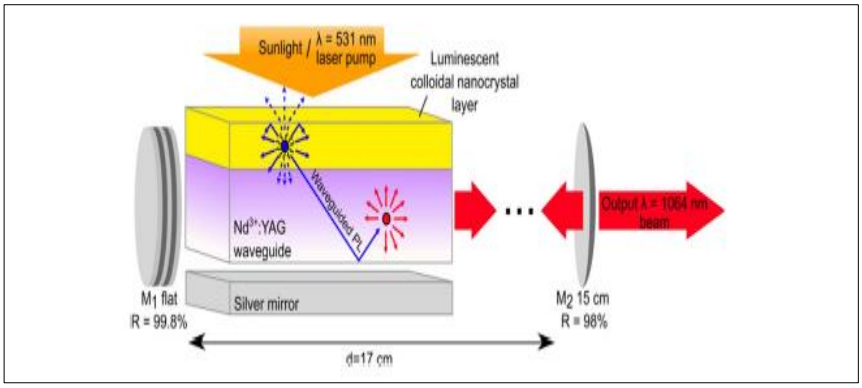
حققت Almeida ايضا سنة 2015 و من معها تحسين طاقة الليزر الشمسية بنمط TEM_{00} وتسجيل ليزر cw بقدرة 5.5W. بضخ وسط ليزر بقطر 4mm و بطول 30mm من Nd: YAG احادي البلورة بواسطة دليل ضوئي مع مقطع عرضي مستطيل كبير. تم الحصول على كفاءة تجميع تبلغ $2.84W/m^2$ وكفاءة انحدار بنسبة 1.2%[34].



الصورة. 26.3 (أ) مخطط نظام التتبع ذو مرآة قطعية مكافئة لمركز PROMES-CNRS. (ب) صورة نظام ليزر Nd: YAG الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (ج) صورة للمنظر الأمامي لتجويف الرنان لليزر غير المتماثل لاستخراج وضع TEM_{00}[34].

- طريقة لضخ الليزر الشمسي عبر نقل الطاقة الإشعاعية:

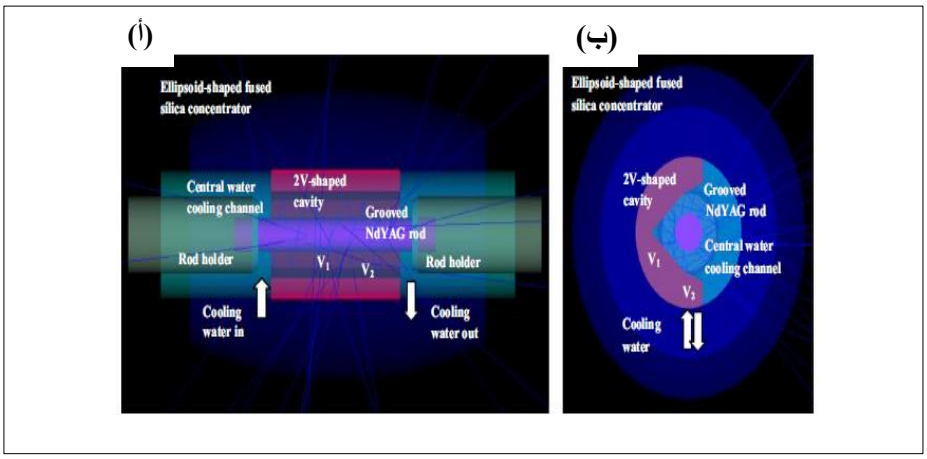
قدم Reusswig, P. D سنة 2015 و من معه تصميما لأشعة الليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية والتي تستخدم مكثفًا شمسيًا مضيئًا (LSC) لتحويل جزء الطيف الشمسي الذي لا يمكن للوسط النشط امتصاصه، إلى نطاق التردد حيث يكون للوسط النشط نطاقات امتصاص قوية، وبالتالي زيادة كفاءة ضخ الليزر[35].



الصورة. 27.3 رسم توضيحي لعناصر نقل الطاقة المتسلسلة لجهاز الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية[35].

- $4.0W/m^2$ كفاءة تجميع الليزر الشمسي من نمط TEM_{00}:

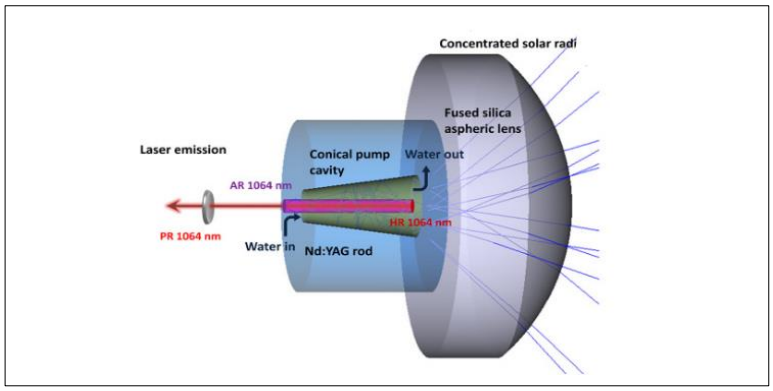
تمكن Liang في سنة 2016 و من معه من الحصول على كفاءة تجميع ليزر بوضع TEM_{00} قياسية تبلغ $4.0W/m^2$ عن طريق الضخ الجانبي لوسط ليزر Nd: YAG محززًا بقطر 4mm وطول 34mm مع مركز ثانوية من السيليكا على شكل إهليلجي وتجويف الضخ على شكل 2V. كما تم تحقيق كفاءة انحدار ليزر قياسي TEM_{00} بنسبة 2.36%[37].



الصورة. 28.3 (أ) المنظر الأمامي و(ب) المنظر الجانبي، لتصميم ضخ الليزر الشمسي البسيط بواسطة نماذج $ZEMAX^{TM}$ المظللة[37].

- كفاءة تجميع الليزر الشمسي $25W/m^2$ مع نظام المرآة المكافئة:

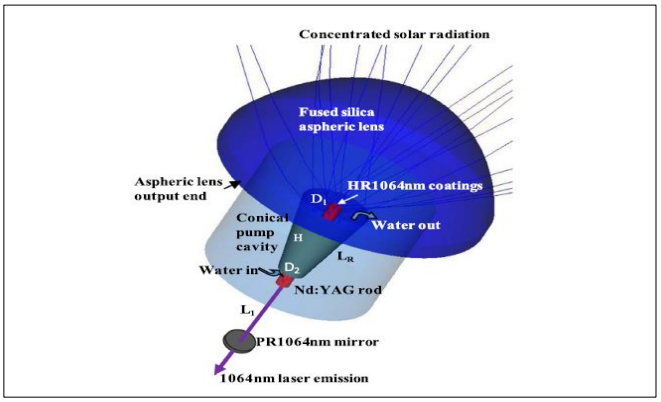
حقق Liang و من معه في نفس السنة تقدما جديدا في كفاءة جمع الليزر الشمسي، باستخدام نظام المرآة المكافئ، تم استخدام عدسة سيليكا كبيرة شبه كروية للضخ الطرفي الجانبي لوسط ليزر احادي البلورة Nd: YAG بقطر 4mm وطول 35mm. تم قياس قدرة الليزرcw 29.3W، و $25.0W/m^2$ من كفاءة تجميع الليزر الشمسي، تم أيضًا قياس 5.1% من كفاءة الانحدار القياسي[39].



الصورة. 29.3 تصميم رأس الليزر Nd: YAG، المكون من عدسة شبه كروية من السيليكا، وتجويف الضخ المخروطي و مرنانة الليزر[39].

- رقمين قياسيين لكفاءة تجميع الليزر الشمسية $31.5W/m^2$ ليزر متعدد الانماط و $7.9W/m^2$ ليزر نمط TEM_{00}:

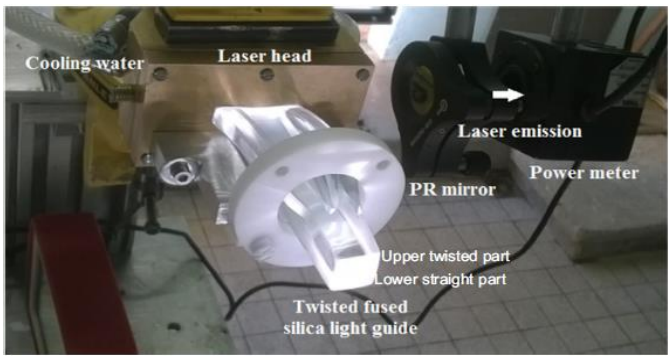
في سنة 2017 Liang و من معه و من خلال الضخ الطرفي الجانبي لوسط ليزر Nd: YAG بقطر 4mm وبطول 35mm أحادي البلورة مع نظام تركيز الطاقة الشمسية بمرآة مكافئ. تم تسجيل أقصى طاقة ليزر شمسي متعدد الأوضاع تبلغ 37.2W، وهو ما يتوافق مع كفاءة تجميع قياسية تبلغ $31.5W/m^2$ وكفاءة انحدار بنسبة 8.9%. تم تسجيل 9.3W طاقة ليزر شمسية cw من نمط TEM_{00} ($M^2 \leq 1.2$) وبالتالي $7.9W/m^2$ كفاءة تجميع ليزر TEM_{00} [40].



الصورة. 30.3 تصميم رأس الليزر Nd: YAG، المكون من عدسة شبه كروية من السيليكا، وتجويف الضخ المخروطي و مرنانة الليزر[40].

- تشغيل ليزر شمسي مستقر من نمط TEM_{00}:

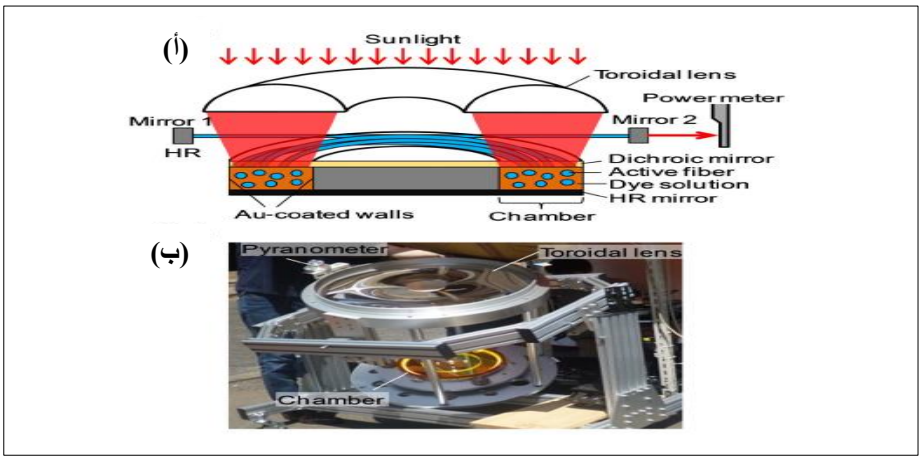
حقق Mehellou و من معه و في نفس السنة ليزر شمسي مستقرة جدًا بنمط TEM_{00} باستخدام مرآة قطعية مكافئة و دليل ضوء من السيليكا الملتوي لضخ جانبي و بشكل موحد قضيب رفيع وطويل Nd: YAG. تم تحقيق شكل شعاع ليزر وضع TEM_{00} ممتاز عند $M^2 \leq 1.05$ واستقرار طاقة خرج جيد جدًا أقل من 1.7%. كان تباين طاقة الليزر المعتمد على خطأ اتجاه الهليوستات أقل بكثير من مخططات ضخ الليزر الشمسي السابقة[41].



الصورة. 31.3 نظام الليزر الشمسي مع دليل ضوئي ملتوي من السيليكا لاستخراج طاقة الليزر المستقرة TEM_{00}[41].

- ليزر شمسي (SPL) منخفض التركيز مع ليزر ليفي:

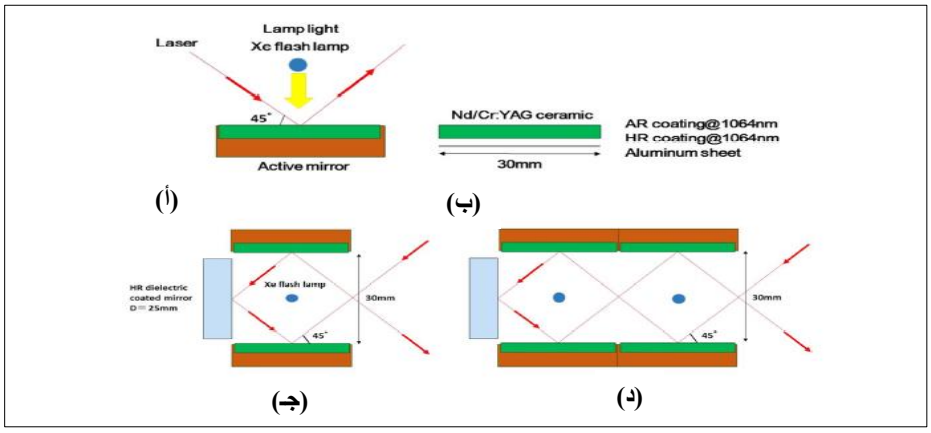
في نفس السنة Masuda 2017 و من معه و لتقليل عتبة الليزر لأشعة الليزر الحالية التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية عند عامل تركيز منخفض للغاية تم استخدام ليزر ليفي بهندسة الاثارة المستعرضة. مع النظام المقترح تم إثبات أن عتبة الليزر الشمسي عند عامل تركيز أقل بمرتين من حجم الليزر التقليدي المضخم بالطاقة الشمسية، مما أدى إلى كفاءة انحدار ضئيلة تبلغ $3.6x10^{-5}$% فقط[42].



الصورة. 32.3 (أ) رسم تخطيطي مقطعي لليزر الالياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية مع هندسة الإثارة المستعرضة التي تم تطويرها (ب) صورة ليزر الألياف الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية[42].

- نظام ليزر متعدد المضخمات باستخدام ضوء الأبيض للضخ:

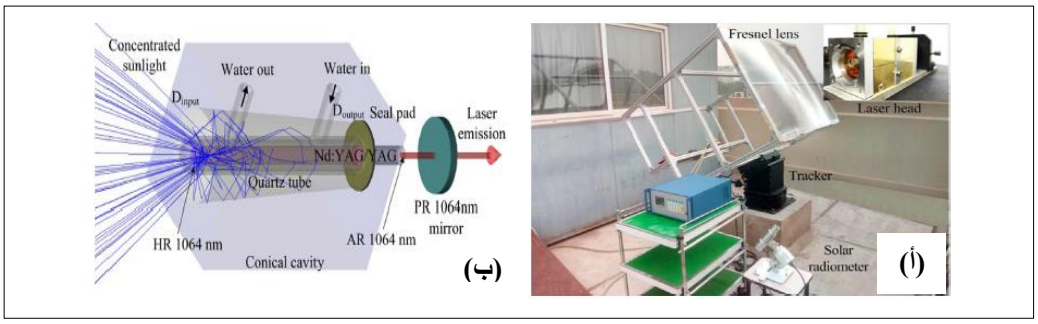
Saiki و من معه في سنة 2017 ايضا، تمت دراسة خاصية التضخيم للسيراميك Nd / Cr: YAG تحت الضخ شبه الشمسي بالضوء تم استخدام مصباح فلاش Xe. تم تضخيم بذرة ليزر cw بطول موجة 1064nm بواسطة مضخم مرآة و وسط Nd / Cr: YAG متعددة المراحل. عند ضخ طاقة ليزر تبلغ $340W/m^2$، كانت درجة حرارة القرص الخزفي 100 درجة مئوية، وتم تحقيق طاقة ذروة ليزر ناتجة تبلغ 1.6kW. بلغت كفاءة التحويل البصري المقدرة لحجم السيراميك الذي يمر فيه الليزر 63% [43].



الصورة. 33.3 التركيب التجريبي (أ) نظام القياس. (ب) بنية المرآة النشطة مضخمة لضوء. (ج) نظام مضخم للضوء بمرآة نشطة بمرحلتين. (د) نظام مضخم للضوء بمرآة نشطة رباعي المراحل[43].

- رقم قياسي في كفاءة تجميع الليزر الشمسي $32.1W/m^2$ باستخدام قضيب محزز من Nd: YAG / YAG وعدسة Fresnel:

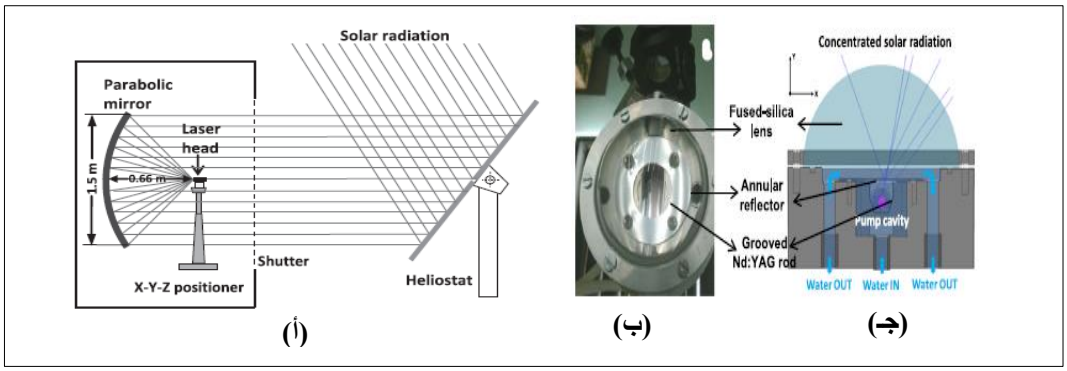
تقدم كبير في كفاءة تجميع الليزر الشمسي حققه Z. Guan و من معه سنة 2018 من خلال قضيب بلوري محزز Nd: YAG / YAG بقطر 6mm و طول 95mm. تم استخدام عدسة فرينل كمركز اولي. تم استخدام تجويف ضخ مخروطي مطلي بالذهب مع عدسة أنبوبية من كوارتز مملوءة بالماء وصلت كفاءة تجميع الى $32.1W/m^2$. تمت مقارنة أداء قضيب الكريستال المترابط المحزز مع قضيب الكريستال المحزز غير المترابط. كان الحد الأقصى لطاقة الليزر من القضيب البلوري المترابط المحزز أعلى بنسبة 22.6% من قيمة القضيب غير المترابط المحزز. تم أيضًا تحسين عامل جودة الحزمة M^2 من 126 إلى 61[45].



الصورة. 34.3 (أ) صورة فوتوغرافية، لعدسة فرينل، و رأس الليزر ونظام تتبع الشمس لمعهد بكين للتكنولوجيا. (ب) رسم تخطيطي لرأس الليزر يتكون من أنبوب كوارتز وتجويف الضخ المخروطي[45].

- شعاع ليزر شمسي Nd: YAG على شكل دونات:

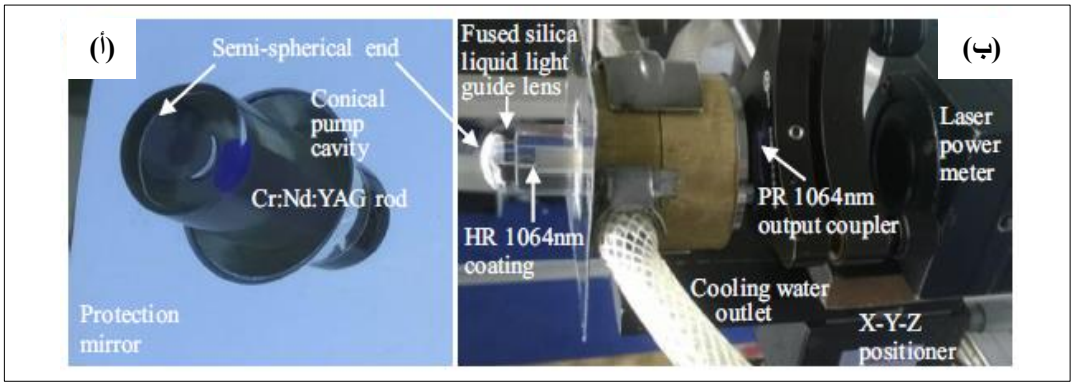
Almeida و من معها في نفس السنة، ابلغوا عن أول انبعاث لشعاع ليزر شمسي على شكل كعكة دونات من قضيب ليزر Nd: YAG محزز بقطر 4.0mm وطول 34mm بالضخ الجانبي، بواسطة نظام تجميع وتركيز الطاقة الشمسية بمرآة مكافئة قطرها 1.5m. تم استخدام عدسة شبه كروية، وتجويف ضخ على شكل شبه منحرف ثنائي الأبعاد. تم الحصول على شعاع ليزر شمسي بقدرة 3.0W على شكل دونات باستخدام مرنان ليزر طويل غير متماثلة[50].



الصورة. 35.3 (أ) مخططات نظام المرآة المكافئة لجامعة لشبونة الجديدة. (ب) بصورة فوتوغرافية لرأس الليزر الشمسي Nd: YAG، (جـ) مخطط لمنظر أمامي لتصميم رأس الليزر[50].

- ليزر شمسي بقضيب من Cr: Nd: YAG بكفاءة انحدار بنسبة 6.7%:

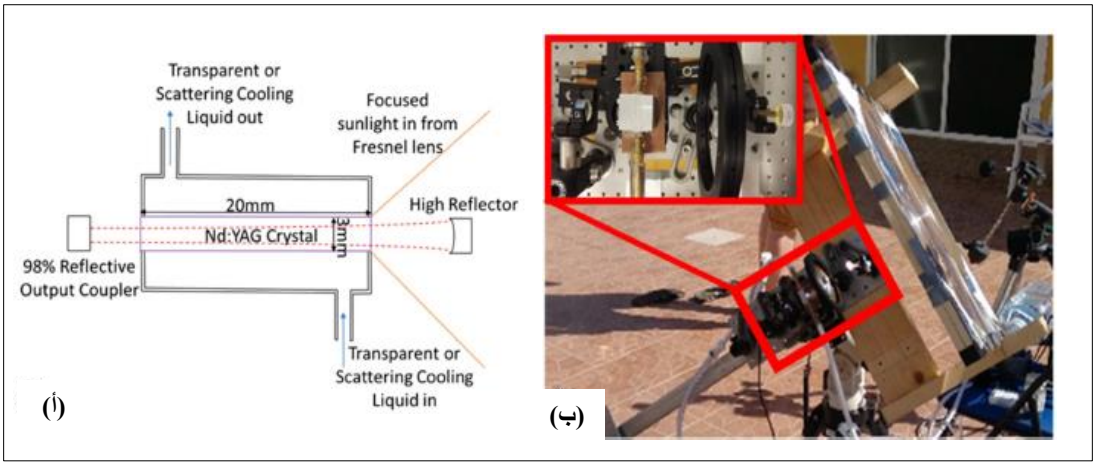
Liang و من معه و في نفس السنة حققوا رقم قياسي جديد في كفاءة التجميع و كفاءة انحدار الليزر الشمسي عن طريق ضخ جانبي لوسط ليزر من السيراميك Cr: Nd: YAG بقطر 4.5mm وطول 35mm بمرآة مكافئة بمساحة 1.0 متر مربع لتجميع الطاقة الشمسية. تم استخدام عدسة من السيليكا و الماء و تجويف ضخ مخروطي. تم قياس طاقة الليزر الشمسية 32.5W ذات الموجة المستمرة 1064nm، والتي تقابل 6.7% من كفاءة الانحدار، أي 1.28 مرة أكثر من الرقم القياسي السابق. كما تم تحقيق أعلى كفاءة لجمع الليزر الشمسي حتى يومنا هذا تبلغ $32.5W/m^2$ و اعلى لمعان لحزمة الليزر الشمسي قدر بـ 6.5W[46].



الصورة. 36.3 (أ) منظر أمامي لرأس الليزر الشمسي مع مرآة حماية لتجنب المحاذاة العرضية للنقطة البؤرية. (ب) منظر جانبي لرأس الليزر الشمسي. مع منظومة تبريد فريدة لقضيب الليزر و دليل ضوئي عبارة عن عدسة من السيليكا وتجويف الضخ المخروطي[46].

- $27.5W/m^2$ كفاءة تجميع ليزر شمسي باستخدام سائل تبريد منتشر:

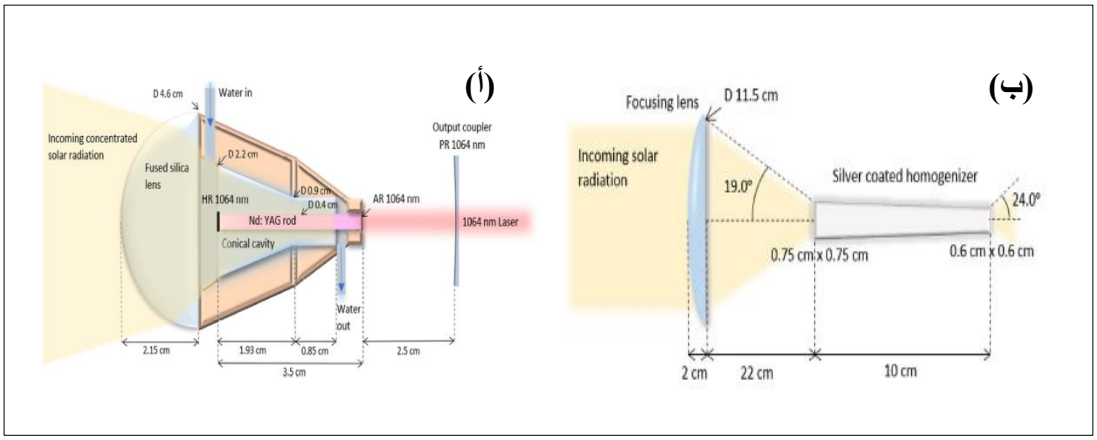
ايضا سنة 2018 C. J. C. SMYTH و من معه ابلغوا عن ليزر الحالة الصلبة الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية باستخدام وسط ليزر Nd :YAG بطول 20 mm وقطر 3mm. تم وضع هذا القضيب في حجرة تبريد سائلة باستخدام مزيج دهان مائي أبيض مستحلب. يوفر هذا المزيج تبريدًا لبلورة الليزر كما يعد أيضًا كسائل مشتت للضوء. تمت نمذجة الامتصاص الشمسي عدديًا في قضيب الليزر باستخدام نموذج تتبع الأشعة تم الحصول على زيادة 2.58 مرة في متوسط الطاقة الناتجة لليزر الشمسي مقارنة باستخدام الماء النقي كسائل تبريد. باستخدام سائل التبريد الأبيض المائي المبعثر، اعطى ليزرًا بقوة تبلغ 2.3W وبكفاءة تجميع تبلغ $27.5W/m^2$[88].



الصورة. 37.3 (أ) رسم تخطيطي لتجويف الليزر، قضيب Nd: YAG، وغرفة سائل التبريد المتشتت. (ب) صورة فوتوغرافية لليزر الشمسي التجريبي قيد التشغيل. يتوافق المربع الداخلي الأحمر مع أجزاء الليزر الموضحة في الجزء (أ)[88].

- تأثيرات التجانس والاختراق للإشعاعات الشمسية المركزة و الليزر الشمسي Nd: YAG 1064nm على عينات صدور الدجاج غير الحي:

في سنة 2019 Miguel Catela و من معه و لمقارنة تأثير الاختراق لكل من الليزر الشمسي 1064nm والإشعاعات الشمسية المركزة على الأنسجة البيولوجية، أجريت تجارب خارج الجسم الحي على عينات من صدور الدجاج بجرعات مماثلة. تم تطوير ليزر شمسي Nd: YAG ومكثف شمسي بسيط لأول مرة، وكلاهما قادر على إصدار طاقة ضوئية 10W. تم العثور على تأثيرات تفاعل مختلفة للأنسجة الخفيفة. تم امتصاص اقل للإشعاع الليزر الشمسي 1064nm من قبل العينات مقارنة بالإشعاع الشمسي، مما أدى إلى اختراق إشعاع الليزر 1064nm للأنسجة، وكشف أن الطول الموجي كان عاملاً حاسمًا في أبحاث التفاعل بين الأنسجة الخفيفة[95].



الصورة. 38.3 (أ) مخطط رأس الليزر الشمسي 1064nm الذي يتم ضخه من الطرف و الجانب وجهاز مرنان الليزر. (ب) مخطط مجانس شعاع ضوء الشمسي المركز[95].

- الليزر الشمسي لقضيب من Ce: Nd: YAG ذو الضخ الجانبي:

أخير و في هذه السنة 2021 Cláudia R. Vistas و من معها، ابلغوا عن تقدم كبير في أداء الليزر الشمسي Ce: Nd: YAG باستخدام طريقة الضخ الجانبي بمرآة قطعية مكافئ. يتكون رأس الليزر الشمسي من عدسة نصف كروية كمركز ثاني وتجويف ضخ على شكل شبه منحرف. تم اختبار أداء وسط ليزر بقطر 4.0mm وطول 35mm من Ce: Nd: YAG ومقارنته بأداء Nd: YAG بنفس الأبعاد. حقق الليزر الشمسي Ce: Nd: YAG كفاءة تجميع $23.6W/m^2$ ، وكفاءة انحدار بنسبة 4.4% ، وكفاءة تحويل طاقة من الطاقة الشمسية إلى ليزر بنسبة 2.8٪ ، وهي 1.57 و 1.47 و 1.56 مرة على التوالي، أعلى من تلك التي تم الحصول عليها باستخدام وسط Nd: YAG. إن الليزر الشمسي المضخ من الجانب Ce: Nd: YAG له أيضًا كفاءة تجميع أكبر بمقدار 1.39 و 1.15 مرة وكفاءة تحويل الطاقة من الطاقة الشمسية إلى الليزر على التوالي، مقارنة بالسجل السابق بواسطة الليزر الشمسي Nd: YAG ذو الضخ الجانبي. إمكانات الكبيرة لقضيب السيراميك Ce: Nd: YAG كوسط كسب لأشعة الليزر الشمسية التي يتم ضخها من الجانب[51].

يلاحظ متتبع السرد التاريخي لتطور الليزر الشمسي ان الابحاث في هذا الميدان بدأت منذ اكثر من خمسين عاما (1963- 2021). الا انه بعد عمل يونغ (Young) سنة 1966 [7] كان هناك تقدم طفيف في ابحاث الليزر الشمسي حتى عام 1984، عندما قام أراشي (Arashi) [22] ومن معه بنشر ابحاثهم عن تطوير ليزر Nd: YAG الذي يتم ضخه بضوء الشمس.

كما تم اعتبار الليزر السائل والغاز كمرشحين لليزر الشمسي [8، 9، 90]، ومع ذلك، فقد تقاربت أبحاث الليزر الشمسي بشكل أساسي في الأنظمة ذات الحالة الصلبة، الى وسائط الليزر المكونة من: Nd: YAG و Cr: Nd: YAG. في أنظمة الليزر Nd: YAG الأولى التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية، بين عامي 1966 و 1988، كان هناك ميل لزيادة طاقة الليزر [7، 21، 22]، ومع ذلك فإن أهم عامل لتقييم الليزر الشمسي هو كفاءته، والتي لم يتم النظر فيها بجدية حتى عام 1996 من قبل Jenkins و من معه الذي أبلغ عن زيادة كبيرة في إنتاج الليزر الشمسي لكل وحدة مساحة لمنطقة التجميع، والتي تم تحسينها إلى $6.7W/m^2$ في 2003 بواسطة Lando و من معه. ظلت هذه قيمة قياسية حتى عام 2007، عندما تم تعزيز كفاءة تجميع الليزر الشمسي إلى $18.7W/m^2$ بواسطة Yabe ومن معه [16] مع اعتماد عدسة فرينل كمركز أولي و Cr: Nd: YAG كوسط نشط. أدى ذلك إلى زيادة حماسة باحثي الليزر الشمسي ، وفي عام 2011 تم تعزيز كفاءة تجميع الليزر الشمسي للـ Nd: YAG إلى $19.3W/m^2$ بواسطة Liang و Almeida[17]. أثارت هذه النتيجة شكوكًا حول أي مادة ليزر، بين Nd: YAG و Cr: Nd: YAG [26]، ستكون أكثر ملاءمة لليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية. في عام 2012، تم تعزيز كفاءة تجميع الليزر الشمسي $30W/m^2$ لوسط ليزر Nd: YAG بواسطة Dinh ومن معه [18]، حيث كان أفضل بشكل غير متوقع من ذلك مع Cr: Nd: YAG. كما تم تحقيق كفاءة الانحدار بنسبة 8.6%. ظلت هذه القيم سجلات حتى عام 2017 [40]. في سنة 2017 تمكن Dawei Liang ومن معه من تحطيم الرقم القياسي الاخير و تحقق كفاءة تجميع قدرت بـ $31.2W/m^2$ لوسط ليزر Nd :YAG احادي البلورة، لم يتم الاحتفاظ بهذا الرقم القياسي وقتا طويل، ففي العام الموالي 2018 تم تعزيز كفاءة التجميع الى القيمة

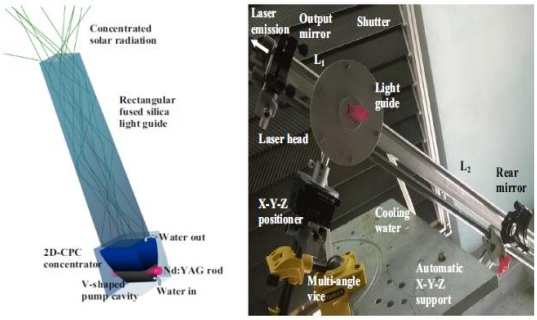
$32.1W/m^2$ من طرف Z. Guan ومن معه بالضخ الشمسي لوسط ليزر محزز من Nd: YAG/YAG. في نفس السنة تم تحقيق رقم قياسي آخر من طرف Dawei Liang ومن معه و الذي قدر بـ $32.5W/m^2$ بضخ وسط ليزر Cr:Nd:YAG[46]. هذا الرقم هو الرقم القياسي لكفاءة التجميع المحققة عمليا الى يومنا هذا.

سطوع شعاع الليزر الشمسي هو أيضًا معلمة مهمة جدًا ، التي تم إهمالها حتى عام 2003 من قبل Lando ومن معه و الذي حقق 0.032W لمعان[15]. تم تعزيز هذه القيمة سنة 2011 من طرف Dawei Liang ومن معه واللذين حققوا 0.089W. تم تحسين هذه المعلمة سنة 2012 من قبل Almeida ومن معها اللذين حققوا 0.29W لمعان ليزر شمسي[17]. تم زيادة هذه القيمة الى 1.9W سنة 2013 من قبل Dawei Liang ومن معه[28]. نفس المجموعة سنة 2015 تمكنوا من تحقيق رقم قياسي لسطوع الليزر الشمسي و الذي قدر بـ 4W[33]. نفس المجموعة سنة 2017 تحقق رقم قياسي 6.5W عن طريق الضخ الطرفي وهي اعلى قيمة الى يومنا هذا[46]. يعد استقرار حزمة الليزر الشمسي أيضًا معلمة أساسية، ولكنها لم تكن عالية جدًا. ومع ذلك في عام 2017، تم الإبلاغ عن استقرار الليزر الشمسي بوضع TEM_{00} المستقر للغاية من قبل Mehellou ومن معه[41].

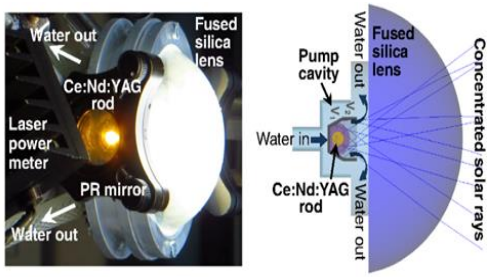
6. مقارنة بين الضخ الطرفي و الضخ الجانبي المباشرين:

على الرغم من أن أنظمة الليزر الشمسي الأكثر كفاءة هي التي اعتمدت على الضخ الطرفي، إلا أن تأثيرات الحمل الحراري الناتجة عن التوزيع غير المنتظم لضوء الضخ الممتصة في وسط الليزر في تصاميم الضخ هذه تؤثر سلبا على كفاءتها[96]. يمكن أن تقدم طرق الضخ الجانبي جودة أعلى لشعاع الليزر لأنه يسمح بتوزيع امتصاص منتظم على طول محور وسط الليزر وينشر الطاقة الممتصة داخل وسط الليزر، مما يقلل من مشاكل الحمل الحراري المصاحبة. فقيم كفاءة المنظومة و لمعان شعاع الليزر للمنظومات الموضحة في الجداول من 2 الى 5 ادناه تؤكد ذلك. ففي سنة 2015 تمكن Liang D و من معه[33] من الحصول على قيمة قياسية للمعان حزمة الليزر 4W عن طريق الضخ الجانبي . لكن بالمقابل كان ذلك على حساب كفاءة الليزر التي لم تتجاوز $1.9W/m^2$. و في سنة 2018 نفس المجموعة[46] و باستخدام الضخ الطرفي تحقق رقم قياسي لكفاءة الليزر $32.5W/m^2$، لكن لمعان حزمة الليزر كان ضعيفا جدا 0.0036W. الجدول الاخير 6.3 يعطي معلومات حول منظومة الليزر التي سجلت اعلى قيمة لطاقة الليزر 120W سنة 2012 من طرف Dinh T. H و من معه باستخدام عدسة فرينل بمساحة $4m^2$ كمركز ابتدائي[18]. و هي التي سنقوم بمقارنة نتائجنا بها بحكم استعمالنا عدسات فرينل بنفس المساحة.

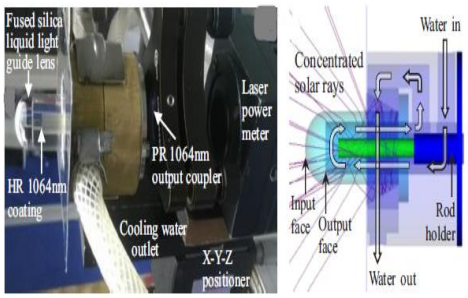
الجدول 2.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة للمعان بالضخ الجانبي

منظومة التركيز و معلمات شعاع الليزر	Liang D ومن معه [33] 2015					تصميم رأس الليزر
المركز الابتدائي	مرآة قطعية مكافئة بقطر 2m اي بمساحة فتحة تقدر بـ $2.3m^2$					
المركز الثاني	دليل ضوئي من السيليكا					
المركز الثالث	مركز من نوع 2D-CPC					
التجويف البصري	مرآة على شكل حرف V					
طريقة الضخ	ضخ جانبي					
الوسط الفعال	قضيب من Nd :YAG قطره 3mm و طوله 30mm					
طاقة الليزر	نوعه	نمطه	4.4W	Cw	TEM_{00}	
كفاءة التجميع (W/m^2)	1.9					
لمعان الحزمة (W)	4					
M^2	1.05 >					

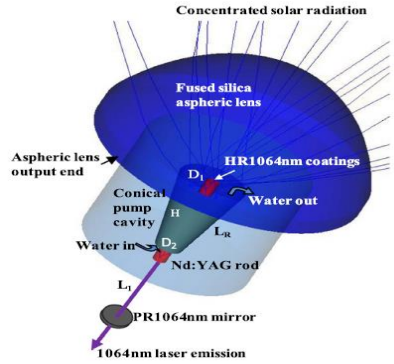
الجدول 3.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة كفاءة التجميع بالضخ الجانبي.

منظومة التركيز و معلمات شعاع الليزر	Cláudia R. Vistas ومن معه[51] 2021					تصميم رأس الليزر
المركز الابتدائي	مرآة قطعية مكافئة بقطر m.... اي بمساحة فتحة تقدر بـ m^2.....					
المركز الثاني	عدسة شبه كروية من السيليكا					
المركز الثالث	//					
التجويف البصري	مرآة على شكل شبه منحرف					
طريقة الضخ	ضخ جانبي					
الوسط الفعال	قضيب من Ce:Nd:YAG قطره 4mm و طوله 35mm					
طاقة الليزر	نوعه	نمطه	W	Cw	TEM_{00}	
كفاءة التجميع (W/m^2)	23.6					
لمعان الحزمة (W)						
M^2						

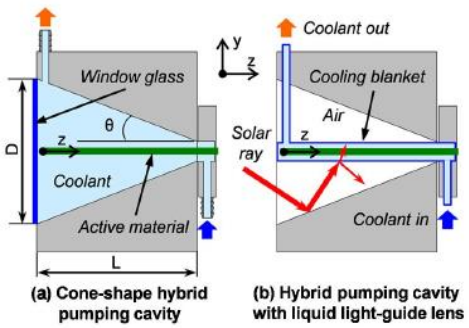
الجدول 4.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة كفاءة التجميع بالضخ الطرفي.

منظومة التركيز و معلمات شعاع الليزر	Liang D و من معه [46] 2018					تصميم رأس الليزر
المركز الابتدائي	مرآة قطعية مكافئة بقطر 1.13m اي بمساحة فتحة تقدر بـ $1.0m^2$					
المركز الثاني	دليل ضوئي من السيليكا					
المركز الثالث	//					
التجويف البصري	مرآة مخروطية					
طريقة الضخ	ضخ طرفي					
الوسط الفعال	قضيب من Nd :YAG قطره 3mm و طوله 30mm					
طاقة الليزر	نوعه	نمطه	32.5W	Cw	MM	
كفاءة التجميع (W/m^2)	32.5					
لمعان الحزمة (W)	0.0036					
M^2	95					

الجدول 5.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى قيمة للمعان بالضخ الطرفي.

منظومة التركيز و معلمات شعاع الليزر	Dawei Liang ومن معه [40] 2017					تصميم رأس الليزر
المركز الابتدائي	مرآة قطعية مكافئة بقطر 1.4m اي بمساحة فعالة تقدر بـ $1.18m^2$					
المركز الثاني	عدسة شبه كروية من السيليكا.					
المركز الثالث	//					
التجويف البصري	مرآة مخروطية					
طريقة الضخ	ضخ طرفي					
الوسط الفعال	قضيب من Nd :YAG قطره 4mm و طوله 35mm					
طاقة الليزر	نوعه	نمطه	9.3W	Cw	TEM_{00}	
كفاءة التجميع (W/m^2)	7.9					
لمعان الحزمة (W)	6.5					
M^2	≤ 1.2					

جدول 6.3 - معلومات حول منظومة الليزر التي اعطت اعلى طاقة ليزر.

منظومة التركيز و معلمات شعاع الليزر	Dinh T. H ومن معه [18] 2012					تصميم رأس الليزر
المركز الابتدائي	عدسة فرينل بمساحة فتحة فعالة تقدر بـ $4m^2$					
المركز الثاني	//					
المركز الثالث	//					
التجويف البصري	مرآة مخروطية					
طريقة الضخ	ضخ طرفي					
الوسط الفعال	قضيب من Nd :YAG قطره 6mm و طوله 100mm					
طاقة الليزر	نوعه	نمطه	120W	Cw	MM	
كفاءة التجميع (W/m^2)	30					
لمعان الحزمة (W)	0.0064					
M^2	137					

7. الخلاصة:

يعد استخدام الإشعاع الشمسي لإنتاج مصادر طاقة جديدة أحد الاهتمامات الرئيسية للبحث العلمي في مجال الطاقات المتجددة اليوم. في هذا السياق يعد تحويل ضوء الشمس عريض النطاق إلى ضوء ليزر المعروف باسم الليزر الشمسي مصدرًا للإشعاع الضيق و المترابط والمتوازي. لهذه التقنية العديد من التطبيقات الارضية و الفضائية. نما العمل على الليزر الشمسي بشكل مطرد منذ عام 1966 وهو العام الذي أنتج فيه C.G. Young. ليزر شمسي بطاقة 1W. دفع هذا العمل العديد من الباحثين إلى تطوير مختلف مكونات منظومات الليزر الشمسي من انظمة تركيز و مواد ليزرية. اعتمدت المرايا المكافئة منذ فترة طويلة كمركز اولي في منظومات الليزر الشمسي، لكن منذ سنة 2007 ادى استخدام عدسات فرينل الى التقليل من تعقيد و وزن وتكلفة الليزر المضخ بالطاقة

الشمسية.

تم النظر في الأنظمة التي تستخدم الشمس لضخ وسائط صلبة و سائلة وغازية. ومع ذلك فإن البحث في الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية قد تقاربت بشكل أساسي في أنظمة ذات مواد صلبة تعمل في وضع الموجة المستمرة (cw) من بين العديد من مواد الليزر. على الرغم من التداخل الصغير بين طيف الامتصاص لـ Nd: YAG وطيف الانبعاث الشمسي يبدو ان Nd: YAG أفضل مادة لتحمل الضخ عالي الكثافة بضوء الشمسية المركز نظرًا لتوصيلها الحراري الممتاز وكفاءتها الكمية العالية ومقاومتها للكسر.

الفصل الرابع

الليزر الشمسي

محاكاة، نتائج و مناقشة

4.الليزر الشمسي محاكاة، نتائج و مناقشة

1. مقدمة:

تعتمد خصائص شعاع الليزر الشمسي بشكل أساسي على طريق ضخ وسط الليزر بالضوء، بعبارة أخرى حول كيفية توجيه ضوء الشمس المركز نحو وسط الليزر. منذ البرهنة الاولى لليزر الشمسي و الى يومنا هذا اعتمدت المنظومات المقترحة سوى منها المحققة عمليا او المصممة بطرق المحاكاة على طريقتين اساسيتين للضخ، هما الضخ الجانبي (العرضي) و يتم فيه توجيه ضوء الشمس الى السطح الجانبي لوسط الليزر الاسطواني كما تبينه **الصورة. 3.3** أو الضخ الطرفي (الطولي) و الذي يتم فيه توجيه ضوء الشمس نحو احدى قاعدتي وسط الليزر الاسطواني و هو موضح في **الصورة. 2.3**. أكثر أنظمة الليزر كفاءة هي المصممة من اجل الضخ من الطرف؛ يمكن تحقيق كفاءة تجميع عالية من خلال طريقة الضخ هذه. ومع ذلك فإن تأثيرات الحمل الحراري الناتجة عن التوزيع غير المنتظم لضوء الضخ الممتصة في هذه الطريقة تؤثر سلبًا على جودة أشعة الليزر [16-18، 27، 31، 39، 40، 44، 45، 47]. و من جانب آخر فإن معظم التطور في سطوع واستقرار الليزر الشمسي [14، 15، 21، 23، 26، 28- 30، 32- 34، 37، 38، 41، 48- 51] كان في تصاميم الضخ الجانبي. تعد تقنية الضخ الجانبي طريقة فعالة لزيادة الطاقة لأنها تسمح بامتصاص منتظم على طول محور وسط الليزر، وبالتالي تحسين الأداء الحراري لليزر الشمسي. إلى جانب ذلك يسمح الوصول السهل إلى طرفي قضيب الليزر بتحسين المزيد من معلمات مرنان الليزر، مما يحسن إلى حد كبير جودة شعاع الليزر ويتيح الانتاج الفعال لليزر الشمسي في أوضاع منخفضة، مقارنةً بتصاميم الضخ الطرفي.

2. الهدف من المشروع:

1.2 الاشكالية:

بما ان طريقة توجيه ضوء الضخ يؤثر في معلمات حزمة الليزر الشمسي الناتجة، هل يمكن اقتراح طريقة ضخ مختلفة عن طريقتي الضخ المعتادتين و تحقق تحسن في كفاءة منظومة الليزر (تحويل ضوء الشمس الى ضوء الليزر)، و تحقيق توزيع منتظم لضوء الضخ على طول الوسط الفعال.

2.2 هدف البحث:

اقتراح منظومة ضخ لليزر الشمسي تعتمد طريقة ضخ جديدة لم يتم القيام بها سابقا لا على المستوى العملي و لا بالمحاكاة. الا و هي تقنية الضخ من الطرفين. و ذلك بإتباع الخطوات التالية:

- اختيار مختلف عناصر المنظومة و تحسين مختلف متغيراتها.
- تجاوز كل العقبات التقنية و ذلك من اجل جعل المنظومة قابلة للتطبيق العملي.

- تصميم منظومة متناظر تسمح بمضاعفة طاقة الليزر الشمسي الناتجة.

3.2 اهمية البحث:

- اقتراح منظومة تعطي طاقة ليزر عالية و بمواصفات محسنة.
- منظومة تقلل من تكلفة الليزر الشمسي و تكون قابلة للتوسيع.
- منظومة قابلة للتطبيق العملي في المستقبل.

3. المنظومة المقترحة:

تم خلال عملية تصميم المنظومة مراعاة ضرورة ضمان المنظومة للضخ من كلا النهايتين للوسط الفعال. و كذلك ضمان تناظر المنظومة من اجل مضاعفة طاقة الليزر الناتجة. و كذلك ضمان اقصى قيمة لطاقة الليزر و ذلك بتقليل الضياع في طاقة الضخ، اضافة الى تجاوز كل الصعوبات التقنية التي تحول دون جعل المنظومة عملية و قابلة للتحقيق.

1.3 اختيار المركز الاولي:

كما تم شرحه في الفقرة 5 من الفصل 3، فإن منظومات الليزر الشمسي اعتمدت بشكل رئيسي على نوعين من المركزات الابتدائية و هما عدسات فرينل و كذلك المرايا القطعية المكافئة. فلكل من هذين المركزين مميزات مختلفة عن الآخر. فعدسة فرينل بدأ استخدامها بشكل فعلي في الليزر الشمسي سنة 2007 و قد حققت تقدم كبير في كفاءة الليزر الشمسي، و ذلك لمميزاتها المختلفة التي نذكر منها:

- خفة الوزن مما يجعلها سهلة التركيب و لا تحتاج لحوامل ضخمة.
- امكانية التصنيع بأحجام كبيرة مقارنة بالمرايا القطعية المكافئة.
- تعطي عدسة فرينل بؤرة صغيرة.
- تكون البؤرة عكس جهة ورود الاشعاع و هذا ما تتطلبه المنظومة المقترحة.
- يمكن التحكم في البعد البؤري لها حسب ما تقتضيه المنظومة بكل سهولة.

الا انه خلال السنوات الاخيرة الماضية تم تحقيق ارقام قياسية في كفاءة التجميع و سطوع الليزر بالرجوع لاستخدام المرايا القطعية المكافئة، كما يمكن ملاحظة ذلك في النبذة التاريخية و الفقرة 6. من الفصل 3. و من مزاياها:

- عالية التركيز.
- لا تحتاج لمرايا موجه للضوء.
- توجه وتركز الضوء في آن واحدة.

- امكانية تدوير البؤرة بأي زاوية.

لذلك ومن اجل مقارنة اداء هذين المركزين على منظومة الليزر المقترحة فقد استخدمنا المركزين، عدسة فرينل و المرآة القطعية المكافئة خارج المحور (Off-axis) في عملية المحاكاة.

2.3 اختيار المركز الثاني:

ان كون عملية الضخ تتم من جهتي طرفي الوسط الفعال يفرض شروط اضافية على اختيار المركز الثانوي و من هذه الشروط ضرورة ترك نهايتي قضيب الليزر حرتين و ملامستين للهواء الخارجي بشكل مباشر و هذا لسببين:

- عدم انتقال فوتونات الليزر اثناء تذبذبها خلال ماء التبريد و الذي سيؤدي حتما الى امتصاصها.
- تجنب تشوه نهاية قضيب الليزر بفعل الحرارة.

هذه الشروط فرضت علينا تجنب استعمال مركزات مملوءة من السيليكا مثل العدسات المحدبة و المخاريط والتي تتميز بتركيزها العالي. هذه المركزات يكون تأثيرها سلبي على فوتونات الليزر عند تذبذبها بين المرآتين حيث سيتم امتصاصها. و لذى كان من الضروري اختيار مركز ثانوي مجوف و يمكن تحقيق ذلك بنوعين من انواع المركزات هما: المرايا المخروطية او المرايا من نوع 3D-CPC. و قد اخترنا النوع الثاني من المرايا و التي تعطي تركيز اكبر للإشعاع من المرايا المخروطية.

3.3 اختيار الوسط الفعال:

Nd : YAG هو الوسط الفعال الاكثر استعمالا في ليزرات الحالة الصلبة عموما، اين يمتلك مزيجا من الخصائص المواتية بشكل فريد لاشتغال الليزر، المضيف YAG صلب و ذو جودة بصرية عالية جدا و لديه موصلية حرارية عالية ايضا، علاوة على ذلك البنية البلورية المكعبة لـ YAG تفضل خطوط تعريض تفلورية ضيقة، و الذي ينتج عنه ربح عالي و عتبة منخفضة لتشغيل الليزر، في Nd : YAG يتم استبدال ثلاثي الإيتريوم Y^{3+} بثلاثي النيوديميوم Nd^{3+}، لذى تعويض الشحنة غير مطلوب.

بالإضافة للخصائص الطيفية و الليزرية المناسبة التي يبديها Nd : YAG، شبكة المضيف تكون جديرة بالملاحظة للمزيج الجذاب وغير الاعتيادي من الخصائص الفيزيائية و الكيميائية و الميكانيكية، بنية YAG تكون مستقرة من ادنى درجة حرارة حتى نقطة الانصهار، و لم يتم ملاحظة اي تحولات في الطور الصلب له، صلابة و قوة YAG اقل من الياقوت لكنها تبقى مرتفعة بما يكفي بحيث عمليات التصنيع العادية لا تنتج مشاكل جدية متعلقة بالكسر.

ان ضرورة ملامسة قضيب الليزر للهواء بشكل مباشر تطلب استعمال قضيب ليزر من نوع YAG / Nd : YAG / YAG كما هو مبين في **الصورة. 1.4**.

الصورة. 1.4 وسط الليزر مكون من YAG / Nd :YAG / YAG.

4. المحاكاة العددية:

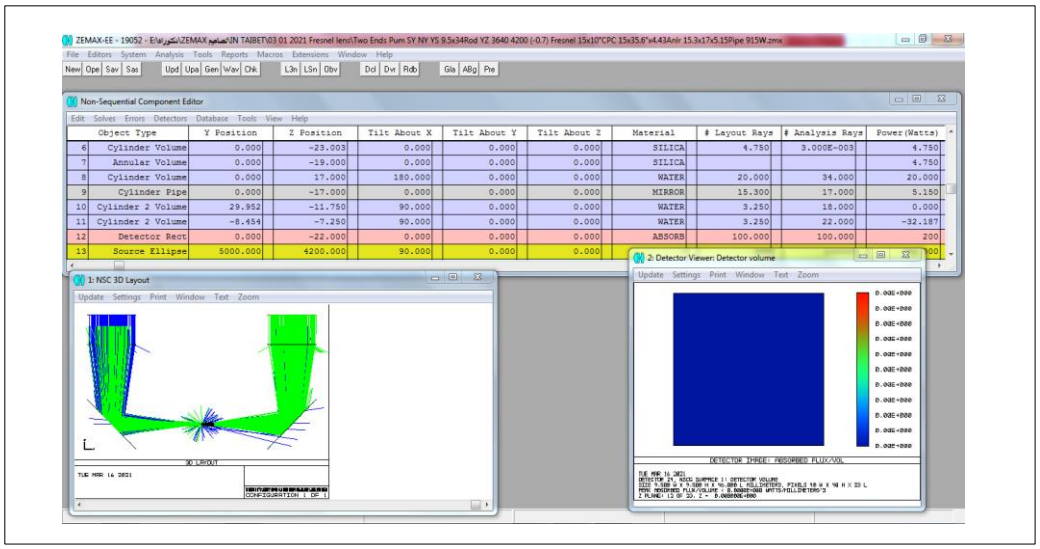
تمت عملية تصميم و تحسين المنظومة باستعمال برنامجي المحاكاة ZEMAX© و برنامج LASCAD©. برنامج ZEMAX© هو برنامج يسمح بنمذجة الأنظمة البصرية وتحليلها والمساعدة في تصميمها. في حين يتيح برنامج LASCAD© الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنانة الليزر.

1.4 برنامج ZEMAX© تصميم منظومة الليزر الشمسي:

ZEMAX هو برنامج تصميم بصري يستخدم لتصميم و تحليل الأنظمة الضوئية و أنظمة الإضاءة. وكان اول برنامج تصميم بصري لنظلم التشغيل Windows تم إصدار الاصدار الاول منه سنة 1990 تحت اسم Max و الذي تم تغييره لاحقا الى اسمه الحالي ZEMAX يستخدم هذا البرنامج في تصميم و تحليل أنظمة التصوير مثل عدسات الكاميرا و كذلك أنظمة الإضاءة. يعتمد أساس هذا البرنامج على تتبع الأشعة و الحزم الضوئية و نمذجة الأشعة من خلال نظام بصري. يمكننا برنامج ZEMAX من تصميم عناصر بصرية مختلفة مثل العدسات العادية و العدسات شبه الكروية والمرايا و العناصر البصرية التفاضلية. من الممكن أيضًا إنتاج رسوم بيانية تحليلية قياسية مثل الرسوم البيانية النقطية والأشعة السينية الجزئية.ZEMAX قادر أيضًا على نمذجة تأثير الطلاءات الخفيفة على سطح المكونات. يمكن لهذا البرنامج إجراء تتبع رقمي متسلسل مستمر بين العناصر الضوئية او التتبع البصري غير التسلسلي لتحليل الضوء. يتوفر ZEMAX على مكتبة للأنظمة الضوئية المختلفة كما يتيح هذا البرنامج اضافة عناصر ضوئية الى مكتبته. تبين **الصورة. 2.4** واجهة برنامج ZEMAX.

الوضع غير المتسلسل The Non-Sequential mode، المستخدم في نمذجة نظام الضخ الشمسي، يجعل تشغيل البرنامج أسهل للأنظمة غير التصويرية. في هذه الطريقة يتم تتبع الأشعة فقط على طول مسار يمكن تحقيقه ماديًا حتى تعترض شيئًا ما. ثم ينكسر الشعاع أو ينعكس أو يمتص، اعتمادًا على خصائص الكائن المضروب، ثم يستمر الشعاع في مسار جديد. في تتبع الأشعة غير المتسلسلة، قد تصطدم الأشعة بأي مجموعة من الأشياء بأي ترتيب، أو قد تصطدم بنفس الجسم بشكل متكرر، اعتمادًا على هندسة وخصائص الكائنات. لهذا السبب تتطلب عمليات المحاكاة غير المتسلسلة عادةً وقتًا أطول للحصول على نتائج دقيقة. يمكن تقسيم جميع الكائنات غير

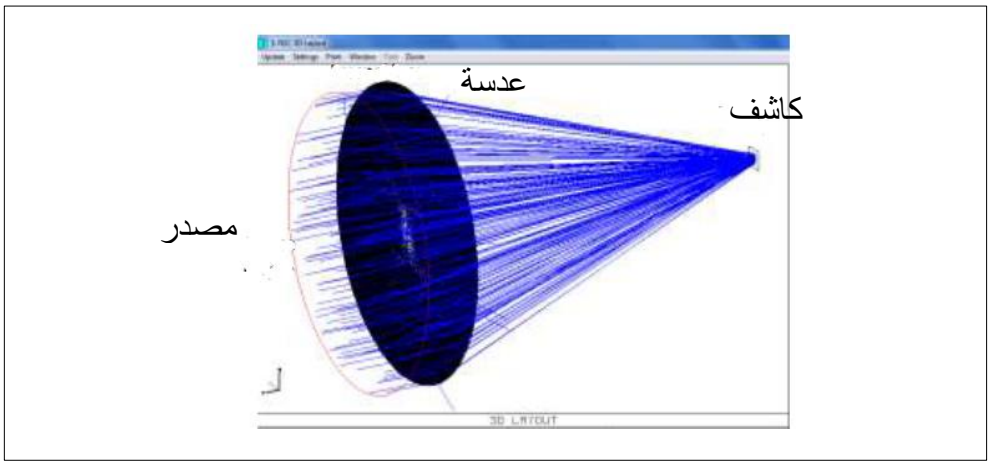
المتسلسلة إلى ثلاثة أنواع: المصادر والعناصر الهندسية البصرية والكاشفات (Sources, geometric optical elements and detectors)، كما هو موضح في **الصورة. 3.4** .



الصورة. 2.4 واجهة برنامج ZEMAX.

1.1.4 المصادر(Sources):

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



الصورة. 3.4 كائنات من الوضع غير التسلسلي لـ ZEMAX لنمذجة عدسة فرينل .

2.1.4 العناصر البصرية الهندسية (geometric optical elements):

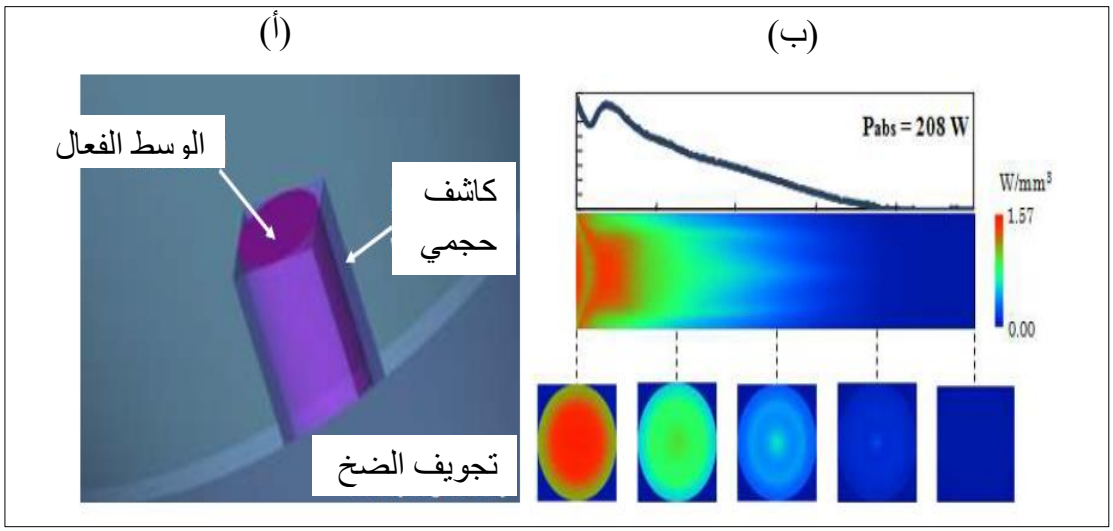
تحدد المكونات الضوئية التي يتم فيها امتصاص الأشعة المنبعثة، وانكسارها، وانعكاسها، وانحرافها، وتشتتها، وتقسيمها، وما إلى ذلك. تمثل هذه الكائنات في هذه الحالة مكونات نظام تجميع وتركيز الطاقة الشمسية ومكونات رأس الليزر.

3.1.4 كائنات الكاشفات (detectors):

تحدد المعلومات النوعية و / أو الكمية لأشعة الواردة باستخدام هذه الكائنات.

4.1.4 تحليل طاقة الضخ الممتصة:

لتوفير معلومات عن طاقة الضخ الواردة او الممتصة، من الضروري استخدام كائنات الكاشف في ZEMAX©، على سبيل المثال لاكتشاف المعلومات العددية في بؤرة المركز، الموضح في **الصورة. 3.4**، عادة ما يتم استخدام الكاشف المستطيل (rectangle detector). يسمح الكاشف المستطيل بتسجيل قدر أكبر من البيانات، مثل الطاقة الواردة والزاوية، وتوزيع الطاقة ثنائي الأبعاد وملف تعريف الطاقة الواردة او الممتصة في المنطقة التي يحددها الكاشف. يمكن وضع هذا النوع من الكاشفات إما داخل أو خارج الجسم وله وظيفة الامتصاص أو الانعكاس أو عدم وجود أي تأثير على الإشعاع الساقط. ومع ذلك يقتصر شكل الكاشف على سطح مستطيل يحدده المستخدم. يمكن ضبط دقة الصورة عن طريق تحديد عدد وحدات البيكسل للكاشف، مع مراعاة التأثير على إجمالي الوقت المطلوب لكل محاكاة.



الصورة. 4.4 (أ) تصميم الوسط الفعال و الكاشف الحجمي في برنامج ZEMAX©. (ب) توزيعات تدفق طاقة الضخ الممتصة على طول خمسة مقاطع عرضية ومقطع طولي مركزي لقضيب Nd: YAG (34 الذي يتم ضخه في النهاية، والذي تم الحصول عليه بواسطة المحاكاة العددية ZEMAX© من خلال كاشف حجمي.

لتحليل طاقة الضخ الواردة أو الممتصة داخل مادة الليزر، وكذلك ملف تعريف المضخة في **الصورة. 4.4**، يتم استخدام كاشف حجمي (detector volume) في هذه الحالة على غرار الكاشف المستطيل، يقتصر حجم الكاشف على شكل مستطيل. ومع ذلك باستخدام هذا الكاشف، من الممكن إضافة بُعد جديد للحصول على معلومات الطاقة نظرًا لأنه يحتوي على شكل متوازي السطوح، يتم تحديد أبعاده من قبل المستخدم، وكذلك عدد وحدات الفوكسل.

دقة عنصر الكاشف الحجمي لها أيضًا تأثير كبير على وقت الحساب لكل محاكاة. في تتبع الأشعة غير المتسلسل ZEMAX©، ينقسم حجم الكاشف لقضيب الليزر إلى إجمالي عدد معين من الفوكسل. ثم يتم العثور على طول المسار في كل فوكسل. بهذه القيمة ومعامل الامتصاص الفعال لـ YAG: Nd^{+3}، من الممكن تصميم النظام البصري بأكمله وتحديد معلماته، والذي ينقل طاقة الضخ إلى الوسط النشط لليزر الشمسي. يمكن حساب طاقة المضخة الشمسية داخل وسط الليزر عدديًا عن طريق جمع إشعاع الضخ الممتصة لجميع المناطق.

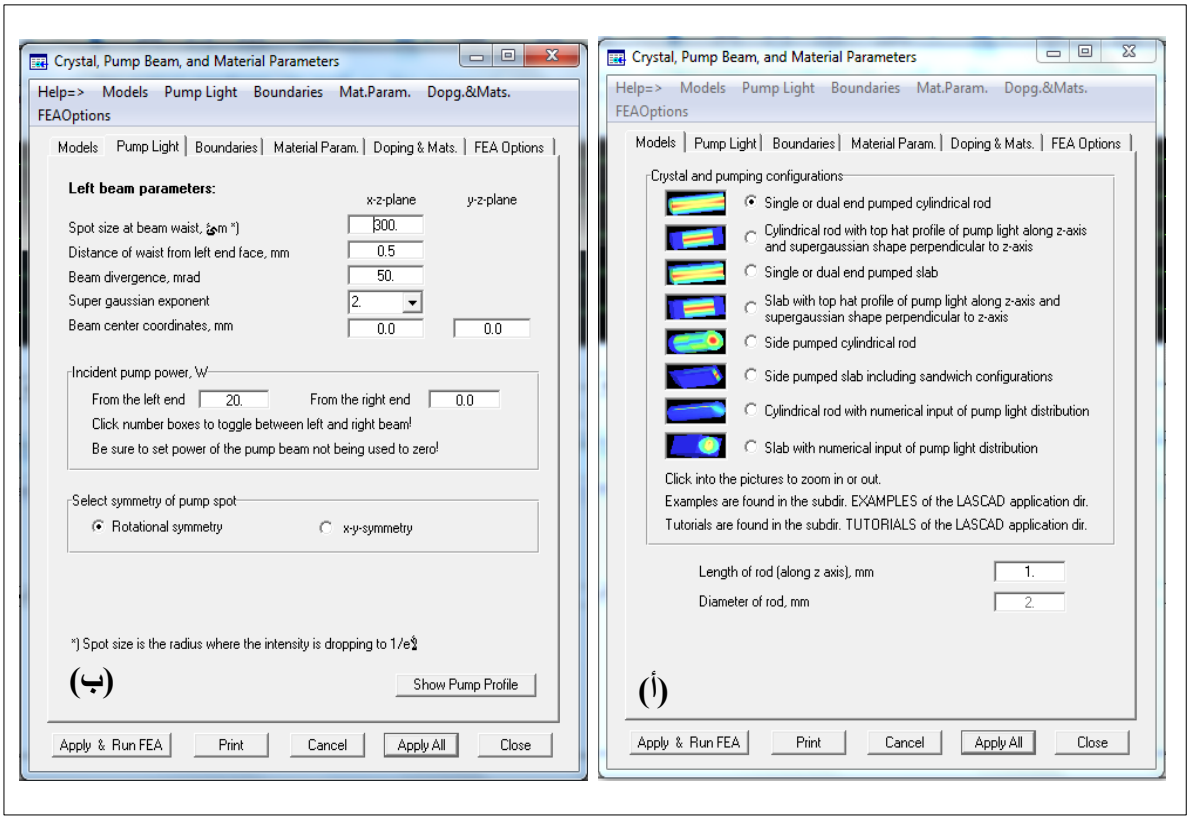
ثم تتم معالجة بيانات تدفق الضخ الممتصة من تحليل ZEMAX© بواسطة برنامج LASCAD© لدراسة معلمات شعاع الليزر وتحديد التأثيرات الحرارية المطبقة في الوسط الفعال.

2.4 LASCAD© - محاكاة التجويف الرنان لليزر الشمسي:

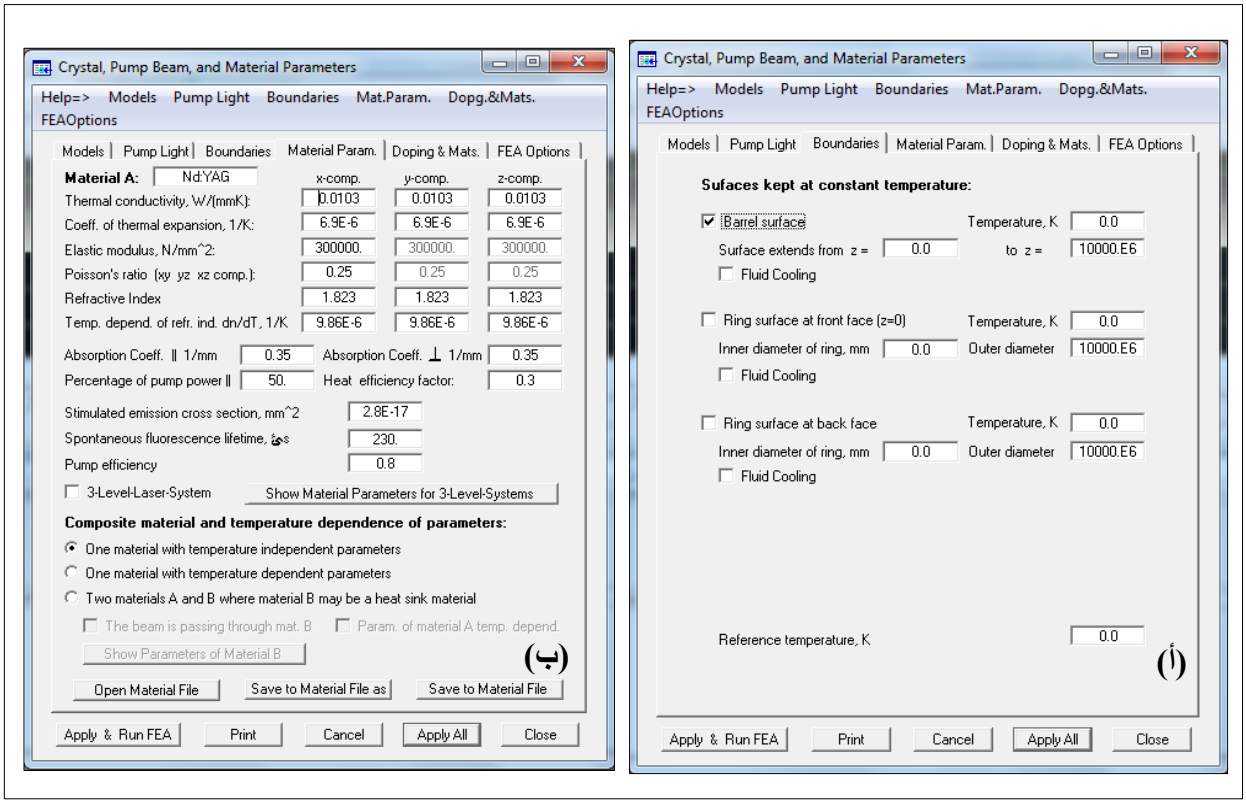
يتيح برنامج LASCAD© الجمع بين العديد من أدوات المحاكاة لتحسين تصميم مرنان الليزر: تحليل العناصر الحرارية والبنيوية المتناهية (FEA)، دليل الانتشار للحزمة الغاوسية ABCD،وخوارزمية انتشار الحزم غير الغوسية - طريقة انتشار الحزمة (BPM). وبالتالي من الممكن نمذجة تجاويف الرنين من خلال تحليل: تأثيرات العدسة الحرارية، والتي تعد واحدة من المشاكل الرئيسية في ليزر الحالة الصلبة، طاقة خرج الليزر متعدد الانماط و TEM_{00} وكفاءة الليزر، جودة ومظهر شعاع الليزر، وكذلك انتشار شعاع الليزر خارج تجويف الليزر، مع مراعاة العديد من ثوابت الليزر، مثل الانعكاسية ونصف قطر الانحناء والمسافة بين مكونات التجويف وخسائر الانعراج وربح التشبع إلخ.

1.2.4 تحليل العنصر المتناهية (FEA) للتأثيرات الحرارية:

يحسب تحليل العناصر المتناهية (FEA) المتغيرات الناتجة عن الحرارة والضغط في بلورة الليزر، مع مراعاة متغيرات مادة الليزر وتكوين المضخة وهندسة التبريد. يوفر LASCAD© عدة نماذج محددة مسبقًا للتصاميم النموذجية، كما هو موضح في **الصورة. 5.4** (أ). ومع ذلك قد يكون لخطة الضخ خصائص خاصة جدًا، والتي لم يتم تحديدها في النماذج المحددة مسبقًا من LASCAD©، كما في حالة الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية. وبالتالي لنمذجة أنظمة الليزر الشمسية بدقة، من الممكن استيراد الملفات من برنامج المحاكاة ZEMAX© أو TracePro©، الذي يمثل محتواه التوزيع ثلاثي الأبعاد لطاقة الضخ الممتصة بواسطة الوسط الفعال المحدد في ZEMAX©، كما هو موضح في **الصورة. 5.4** (ب).



الصورة. 5.4 (أ) نماذج اعدادات بلورة الليزر والضخ من برنامج LASCAD© (ب) متغيرات ضخ الليزر التي تم الحصول عليها من خلال ملف بيانات ZEMAX©.



الصورة. 6.4 (أ) متغيرات التبريد لنظام الليزر ذو الضخ الطرفي (ب) متغيرات مادة الليزر Nd: YAG.

يتم تحديد متغيرات التبريد للوسط الفعال، بالإضافة إلى خصائص المواد، على التوالي في قوائم الحدود ومتغيرات المواد **الصورة. 6.4** (أ) و (ب).

أخيرًا يتم تحديد شروط المحاكاة، مثل الدقة وعدد التكرارات في خيارات Tab FEA. بعد تحديد جميع المتغيرات المتعلقة بالضخ، يمكن البدء في الوسط النشط والتبريد والتحليل الحراري والبنيوي بواسطة العناصر المتناهية (FEA). يتم إجراء التحليل الحراري من خلال ثلاث خطوات:

1. تحديد توزيع الحمل الحراري .

2. حل المعادلات التفاضلية ثلاثية الأبعاد للتوصيل الحراري.

3. حل المعادلة التفاضلية للتشوه البنيوي [97]. يتم إعطاء المعادلات التفاضلية للتوصيل الحراري من خلال:

$$-div[k(T)\nabla(T)] = Q(x,y,z) \qquad (1.4)$$

أين κ هو معامل التوصيل الحراري، T هي درجة الحرارة الثابتة لسطح الوسط الفعال ، المحدد في©LASCAD (في علامة التبويب الحدود)، $Q(x, y, z)$ هو توزيع الحمل الحراري في الوسط الفعال، الناتج إما عن نماذج مخطط الليزر المحددة مسبقًا في ©LASCAD أو تحليل تتبع الأشعة ©ZEMAX.

يتم إعطاء المعادلات التفاضلية للتشوه البنيوي من خلال علاقة توتر الإجهاد:

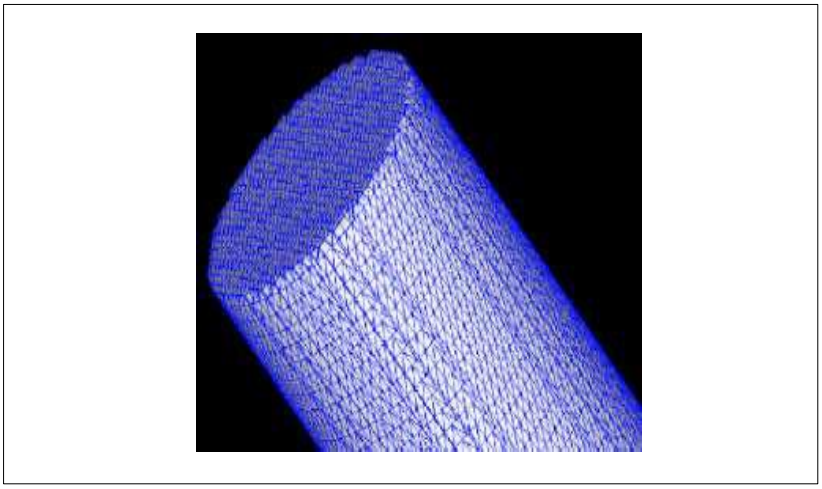
$$(\varepsilon_{ij}) = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)(T - T_0) + \frac{1}{E}C^{-1}(\sigma_{ij}) \qquad (2.4)$$

حيث ε_{ij} هو موتر الاجهاد المعطى بواسطة:

$$(\varepsilon_{ij}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (3.4)$$

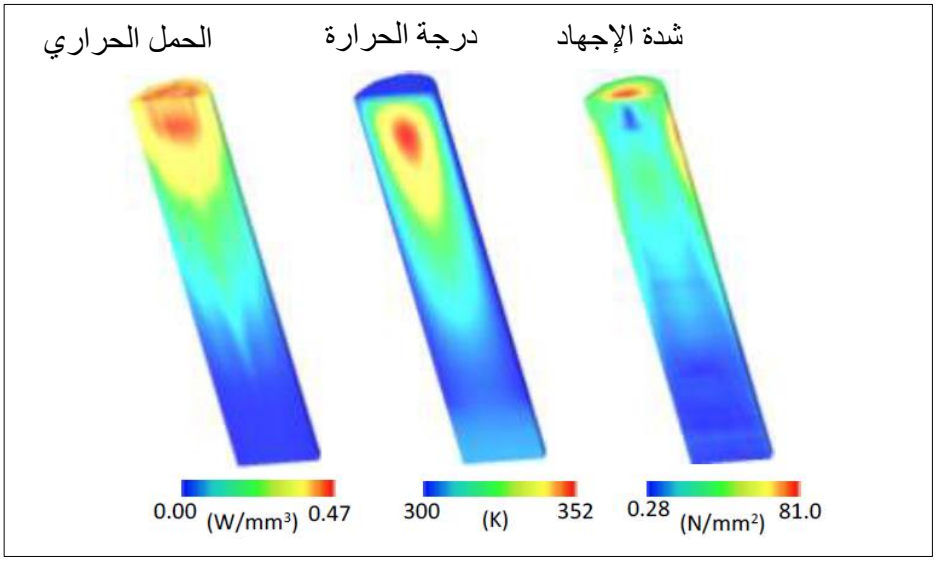
α_i هو معامل التمدد الحراري، E هو معامل المرونة، σ_{ij} موتر الإجهاد و u_i الإزاحة.

لحل هذه المعادلات التفاضلية، يقسم دليل FEA لـ ©LASCAD بلورة الليزر في شبكة ثلاثية الأبعاد **الصورة. 7.4**، والتي يتم تحديد دقة وضوحها من قبل المستخدم، وتتكرر من خلال هذه عدد محددة من المرات. تعتمد دقة النتائج بشكل مباشر على دقة الشبكة، وكذلك على وقت المحاكاة.



الصورة. 7.4 شبكة غير منظمة في حالة وجود الوسط ليزري.

يؤدي تشغيل FEA إلى توليد البيانات المستخدمة لمحاكاة العدسات الحرارية داخل تجويف الليزر. كما أنها تنتج تمثيلات ثلاثية الأبعاد للحمل الحراري البلوري ودرجة الحرارة والضغط ، كما هو موضح في **الصورة. 8.4**، بالاعتماد على المعادلات أعلاه التي تصف التوصيل الحراري والتشوه البنيوي والامتصاص[97]. تعتمد النتائج المتبقية للخوارزميات داخل LASCAD© على نتائج FEA.

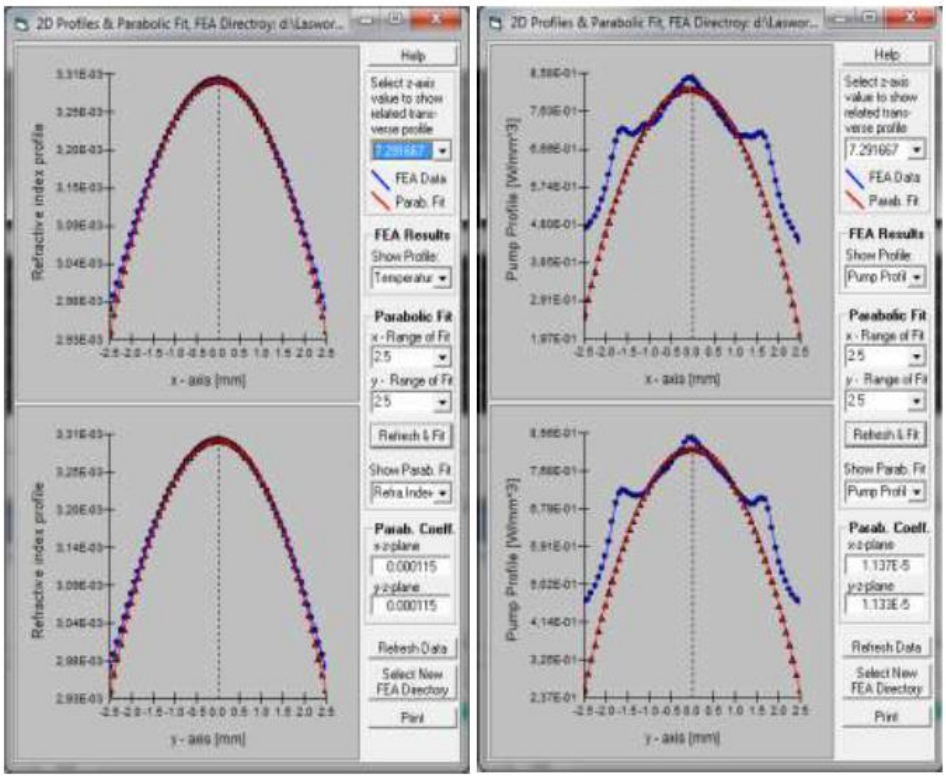


الصورة. 8.4 توزيعات الحمل الحراري ودرجة الحرارة وشدة الإجهاد ، تمت محاكاتها عدديًا في LASCAD© لوسط فعال قطره 5mm وطوله 25mm منNd: YAG.

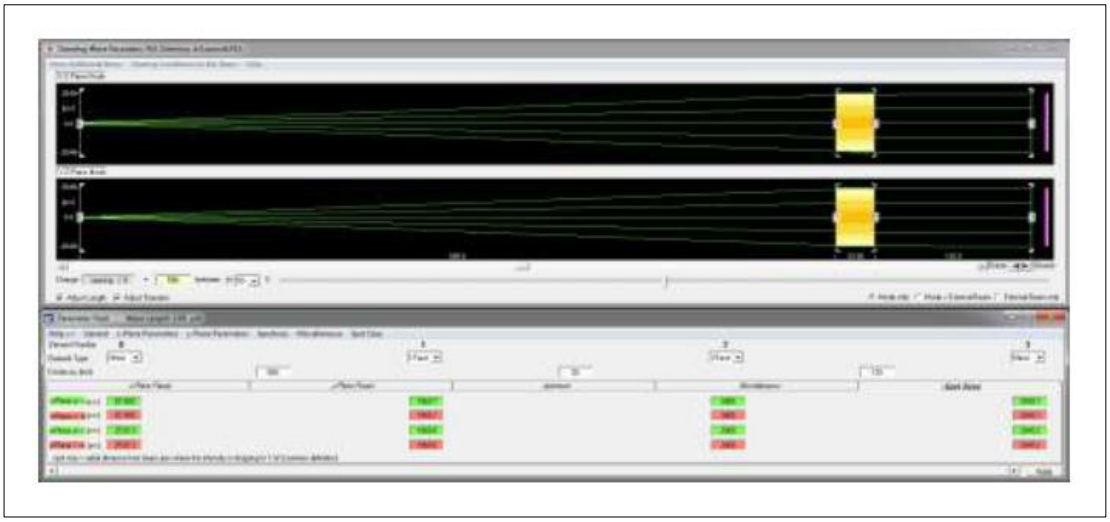
2.2.4 طريقة المصفوفة الغاوسية ABCD (GAUSSIAN ABCD MATRIX) :

عند استخدام نتائج شبكة FEA، يمكن تحديد عنصر العدسة الحرارية بالتقريب المكافئ، كما هو موضح في **الصورة. 9.4** بنفس الطريقة، يتم تحقيق ملاءمة الوجوه الطرفية المشوهة من الكريستال. باستخدام معاملات القطع المكافئ التي تم الحصول عليها، من الممكن نمذجة تجويف الرنين من خلال خوارزمية مصفوفة انتشار الحزمة الغوسية (كود ABCD). لتصور نتائج نهج المصفوفة ABCD، حجم البقعة للنمط الرئيسي، بالإضافة إلى النمط

المتعدد، على طول محور الرنان. لحساب الاستجماتيزم يتم إجراء الحسابات في وقت واحد في مستويين متعامدين على محور الرنان، كما هو موضح في **الصورة. 10.4**.

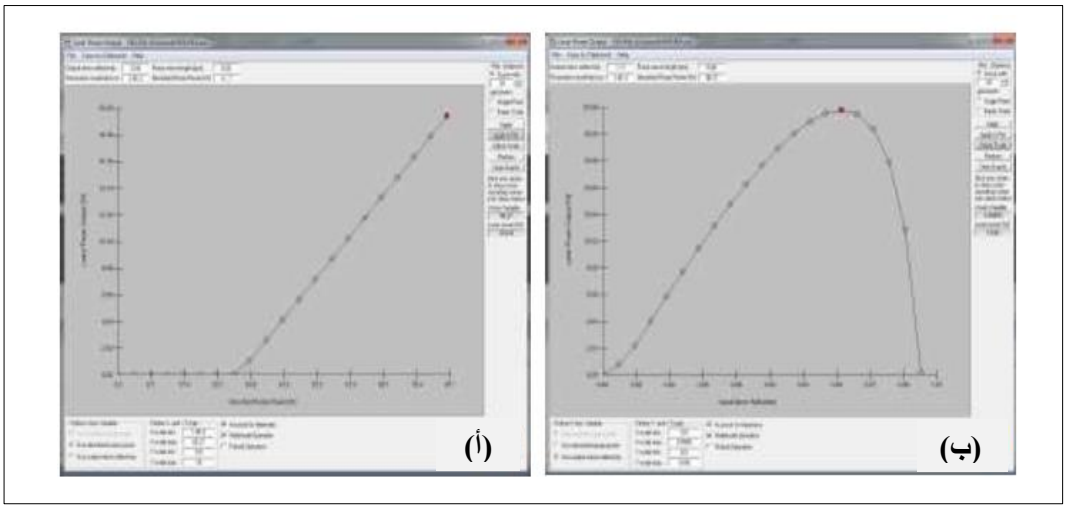


الصورة. 9.4 طريقة القطع المكافئ لتحديد العنصر التمثيلي للوسط النشط داخل تجويف الرنان.



الصورة. 10.4 تمثيل تجويف الرنين وشعاع الليزر المنتشر في المستويات X-Z و Y-Z من أجل الإنتاج الفعال لطاقة الليزر الشمسية ذات النمط الأساسي.

من خلال توزيع النمط الغاوسي Gaussian وتوزيع طاقة الضخ الممتصة، من الممكن حساب طاقة الليزر متعدد الانماط أو للنمط TEM_{00} في وضع التشغيل الموجي المستمر (cw) أو وضع التشغيل النبضي من خلال معادلات معدل الليزر[98]. يمكن تصور منحنى انبعاث الليزر كدالة إما للطاقة الممتصة أو انعكاسية المرآتين، كما هو موضح في **الصورة. 11.4** (أ) (ب) على التوالي. بالإضافة إلى ذلك من الممكن تحسين مرنان الليزر عن طريق تغيير طوله، وزاويته بين المكونات المختلفة، وتطبيق المرايا أو العدسات، وتغيير البعد البؤري للمكونات إلخ.



الصورة. 11.4 طاقة خرج الليزر المحسوبة عدديًا كدالة لـ (أ) طاقة الضخ الممتصة و (ب) انعكاسية مقرنة الخرج ، للمرجع.

في تحليل LASCAD©، يتم الحصول على طاقة الليزر الصادر P_{out}، عن طريق حساب عدد فوتونات الليزر التي تمر بمرآة الاصدار لكل وحدة زمنية من خلال علاقة الطاقة الناتجة:

$$P_{out} = h\upsilon_L S_L \frac{C\left(-ln(R_{out})\right)}{2\tilde{L}} \qquad (4.4)$$

حيث h هو ثابت Planck، υ_L تردد ضوء الليزر، S_L عدد الفوتونات التي تمر بمرآة الاصدار، c سرعة الضوء في الفراغ ($2.998x10^8 m/s$)، R_{out} انعكاسية مرآة الاخراج، و L طول المسار البصري لتجويف الرنين، والذي يتم إعطاؤه بواسطة

$$\tilde{L} = L_{Res} + nL_A - L_A \qquad (5.4)$$

حيث L_{Res} هو طول التجويف الكلي و L_A هو طول الوسط الفعال. n هو معامل الانكسار لمادة الليزر.

يمكن الحصول على عدد الفوتونات في تجويف رنين الليزر من خلال المعادلة (6.3):

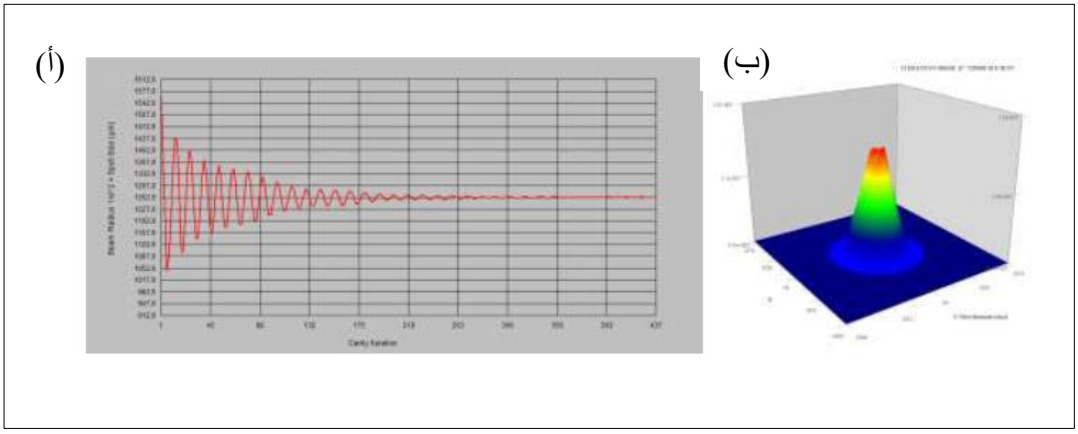
$$S_L = \tau_c \eta_P S_P \iiint \frac{p_0(x,y,z)}{1+\frac{n}{c\sigma\tau S_L s_0(x,y,z)}} dV \qquad (6.4)$$

يمكن حل هذه المعادلة بالتكامل التكراري، حيث يمتد التكامل على حجم الوسط الفعال. τ_c هو متوسط عمر فوتونات الليزر في تجويف رنين الليزر، η_p هي كفاءة الضخ S_p هو العدد الإجمالي لفوتونات الضخ الممتصة في البلورة لكل وحدة زمنية.

$p_0(x, y, z)$ هو توزيع كثافة طاقة الضخ الممتصة المقاسة على حجم البلورة، σ المقطع العرضي للانبعاثات المستحثة، τ هو عمر التفلور التلقائي لمستوى الليزر العلوي، و$s_0(x, y, z)$ التوزيع الطبيعي لفوتونات الليزر.

3.2.4 طريقة انتشار شعاع الليزر (BPM):

في الحالات التي يكون فيها التقريب المكافئ ورمز مصفوفة ABCD غير كافيين، يمكن استخدام نتائج FEA كمدخلات لطريقة انتشار الحزمة (BPM) لتحويل فوريه السريع (FFT)[99]. يوفر هذا الرمز محاكاة ثلاثية الأبعاد كاملة لتفاعل واجهة موجة تنتشر عبر بلورة الليزر الساخنة المشوهة حرارياً. استنادًا إلى مبدأ Li و Fox [100]، يتم حساب سلسلة من الرحلات ذهابًا وإيابًا عبر الرنان، والتي تتقارب أخيرًا مع الوضع الأساسي، **الصورة. 12.4** (أ)، أو لتراكب الأنماط العرضية ذات الترتيب الأعلى. يتم أيضًا توضيح ملف تعريف الكثافة في مرآة الإخراج، حيث يتطور مع زيادة عدد التكرارات أثناء تشغيل الحساب، كما هو ملاحظ في الشكل **الصورة. 12.4** (ب). يأخذ رمز BPM أيضًا في الاعتبار ديناميكيات الكسب وتأثيرات الانعراج، بسبب الامتداد المحدود للفتحات والمرايا.



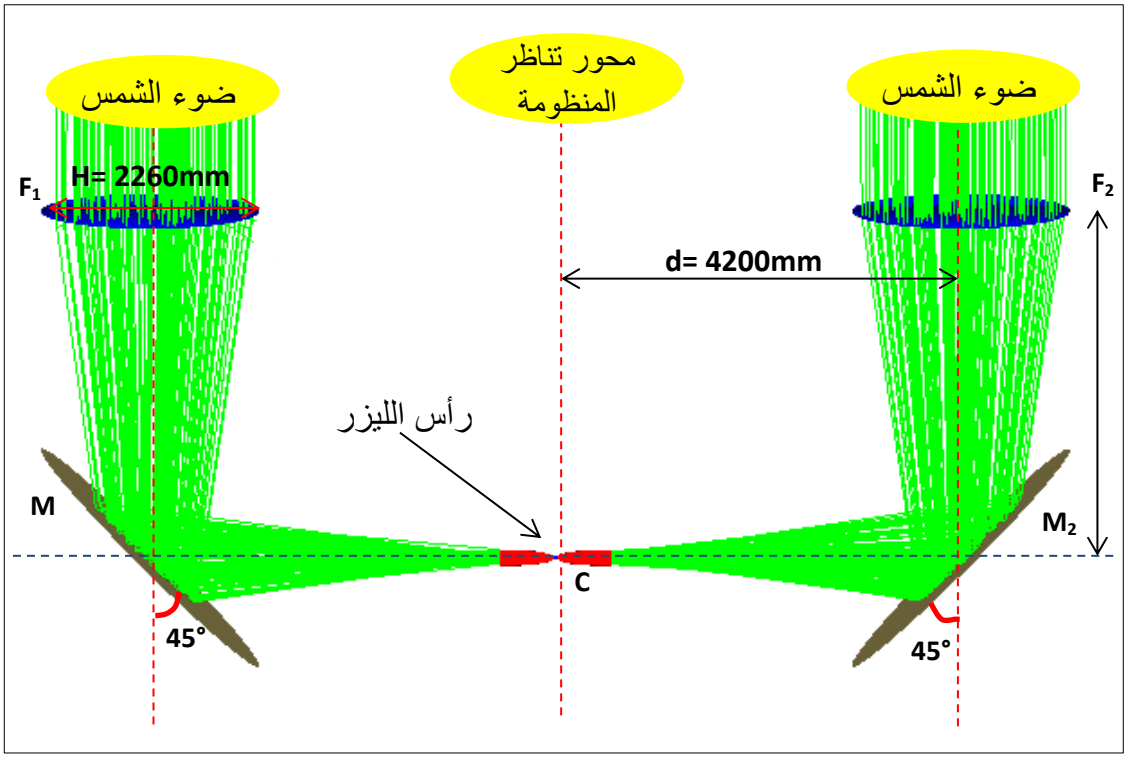
الصورة. 12.4 (أ) نصف قطر شعاع الليزر BPM على تكرار التجويف و (ب) ملف شعاع المرآة الناتج.

5. منظومة ضخ الليزر الشمسي بعدستي فرينل:

تمت محاكاة منظومة الليزر الشمسي باستخدام برنامج ZEMAX© و برنامج LASCAD©. بعد اجراء العديد من التغيرات على كل عناصر المنظومة وتجريب العديد من وسائط الليزر ذات ابعاد مختلفة و محاولة تجاوز كل العقبات التي تؤدي الى مزيد من ضياع طاقة الضخ او تحول دون جعل المنظومة قابلة للتطبيق العملي. تم الوصول الى منظومة نهائية تعطي اقصى طاقة ممتصة لضوء الضخ واقصى طاقة ليزر متعدد الانماط.

1.5 منظومة التركيز الاولية باستخدام عدستي فرينل:

تتكون منظومة التركيز الابتدائية كما تبينه **الصورة. 13.4** من عدستي فرينل F_1 و F_2 قطر كل منهما 2260mm اي بمساحة اجمالية $8m^2$، بعدها البؤري حوالي 8.2m، مصنوعتين من مادة البولي ميثيل ميثاكريليك (**Polymethyl Methacrylate**) PMMA. وهي شفافة للأطوال الموجية المرئية و تحت الحمراء القريبة، و تقطع الاشعاع غير المرغوب فيه بعد 2200nm و اقل من 350nm. تقع عدستي فرينل على ارتفاع 4820mm فوق المحور الافقي لمنظومة التركيز الثانية. وعلى مسافة 4200mm من محور تناظر المنظومة (المحور الشاقولي المار بمركز رأس الليزر النقطة C) **الصورة. 13.4**.



الصورة. 13.4 منظومة التركيز الابتدائية المتناظرة المكونة من عدستي فرينل F_1 و F_2، و مرآتين مستويتين M_1 و M_2.

تركزان الاشعاع الوارد من المنبع في بؤرة يتم تدويرها بزاوية 90° بواسطة مرآتين مسطحتين M_1 و M_2 تميلان عن الشاقول بزاوية 45°، وذلك من اجل توجيه الاشعاع المركز نحو منظومة التركيز الثانية التي تقع على طول المحور الافقي الواصل بين المرأتين والذي يوافق المحور البصري للمنظومة، تقع بؤرة كل عدسة على مسافة 620mm من مركز رأس الليزر النقطة C.

2.5 رأس الليزر:

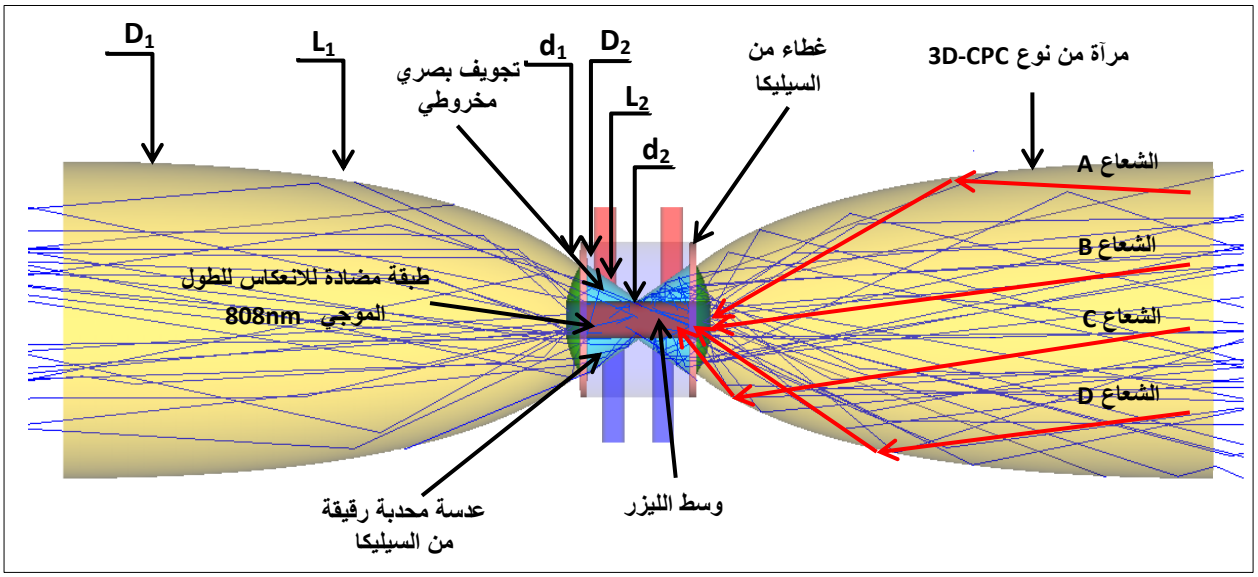
رأس الليزر **الصورة. 14.4** عبارة عن منظومة متناظرة بالنسبة للمحور العرضي لوسط الليزر و هو مكون من خمسة اجزاء هي:

1.2.5 المركز الثاني:

و هو عبارة عن مرآتين من نوع 3D-CPC ابعاد كل منهما D_1= 192mm و L_1 = 650mm و d_1 = 30mm و زاوية قبول تساوي 9° **الصورة. 14.4**.

2.2.5 المركز الثالث:

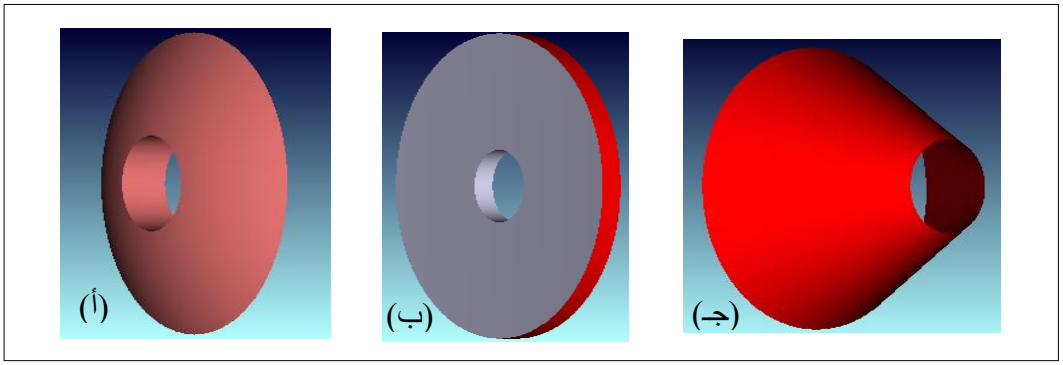
عبارة عن عدسة محدبة مثقوبة من السيليكا كما هو مبين في **الصورة. 14.4** و **الصورة. 15.4** (أ). نصف قطر انحناؤها يساوي 35.7mm و قطر فتحتها البصرية يساوي 30mm و قطر ثقبها يساوي 9.5mm سمك العدسة يساوي حوالي 4.43mm.



الصورة. 14.4 منظومة التركيز الثانية المتناظرة و المكونة من مركزين من نوع 3D-CPC، و عدستين رقيقتين مثقوبتين من السيليكا، و تجويف بصري عبارة عن مرآتين مخروطيتين.

3.2.5 غطاء من السيليكا:

سمكه 2mm به ثقب قطره 9.5mm. و هو مبين في **الصورة. 14.4** و **الصورة. 15.4** (ب).



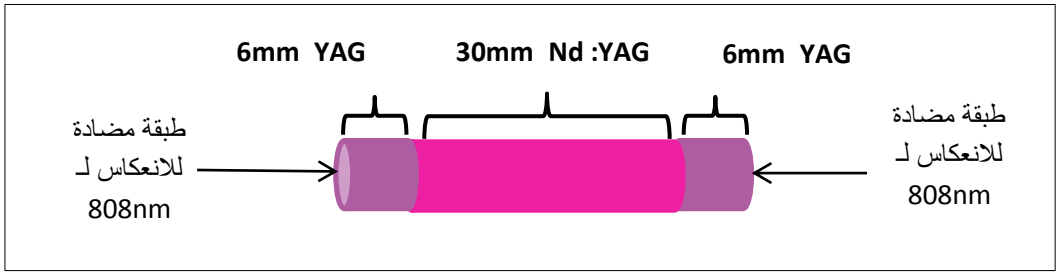
الصورة. 15.4 (أ) عدسة محدبة من السيليكا مثقوبة، (ب) غطاء من السيليكا مثقوب، (جـ) مرأة مخروطية.

4.2.5 التجويف البصري:

و يتكون من مرآتين مخروطيتين كما هو مبين في **الصورة. 14.4** و **الصورة. 15.4** (جـ). ابعادهما $D_2 = 30mm$ و $L_2 = 15mm$ و $d_2 = 10mm$.

5.2.5 وسط الليزر:

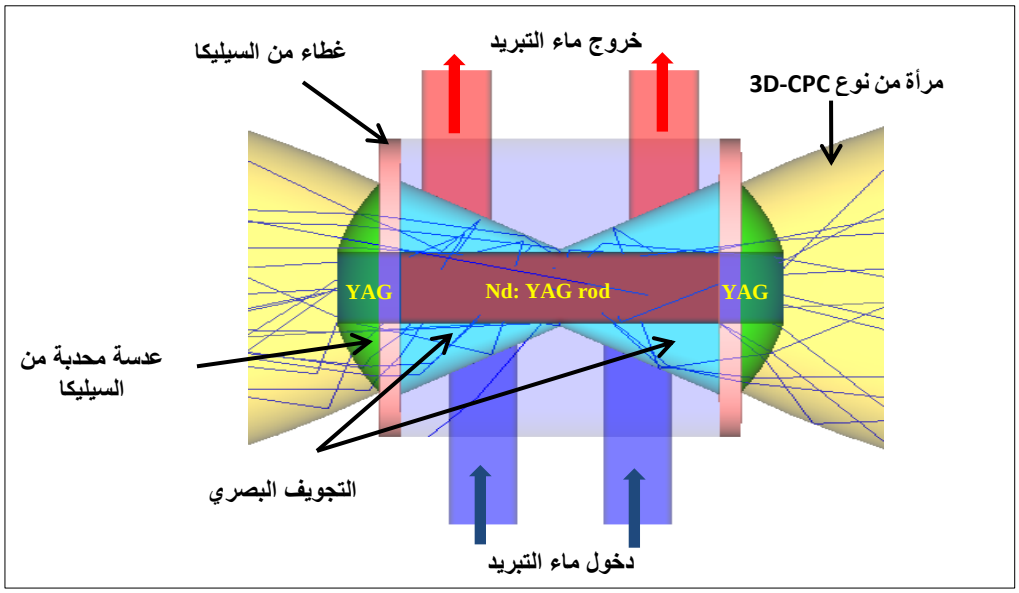
تضخ هذه المنظومة قضيب من YAG/Nd:YAG/YAG كما تبينه **الصورة. 14.4** و **الصورة. 16.4** قطره 9.5mm و طول كل قطعة من 6mm YAG و طول جزء الـYAG :30mm Nd اي طوله كاملا 42mm، يتم تثبيته بواسطة غراء بصري من جزئه YAG في ثقبي الغطاء و العدسة الشبه كروية (المركز الثالث). كما تم طلاء نهايتيه بطبقة رقيقة من السيليكا مضادة للانعكاس سمكها 3µm.



الصورة. 16.4 وسط الليزر مكون من YAG / Nd :YAG / YAG.

6.2.5 منظومة التبريد:

المبينة في **الصورة. 17.4** و التي تتكون من اربعة انابيب قطر كل منها 6.5mm اثنان منها لإدخال الماء و اثنان لإخراجه. حيث يكون انبوبا الادخال قريبين من مركز الوسط الفعال اما انبوبا الاخراج يكونان في اطرافه و ذلك لضمان مرور ماء التبريد على طول الوسط الفعال.



الصورة. 17.4 منظومة التبريد

3.5 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي :

1.3.5 نتائج المحاكاة ببرنامج ZEMAX©:

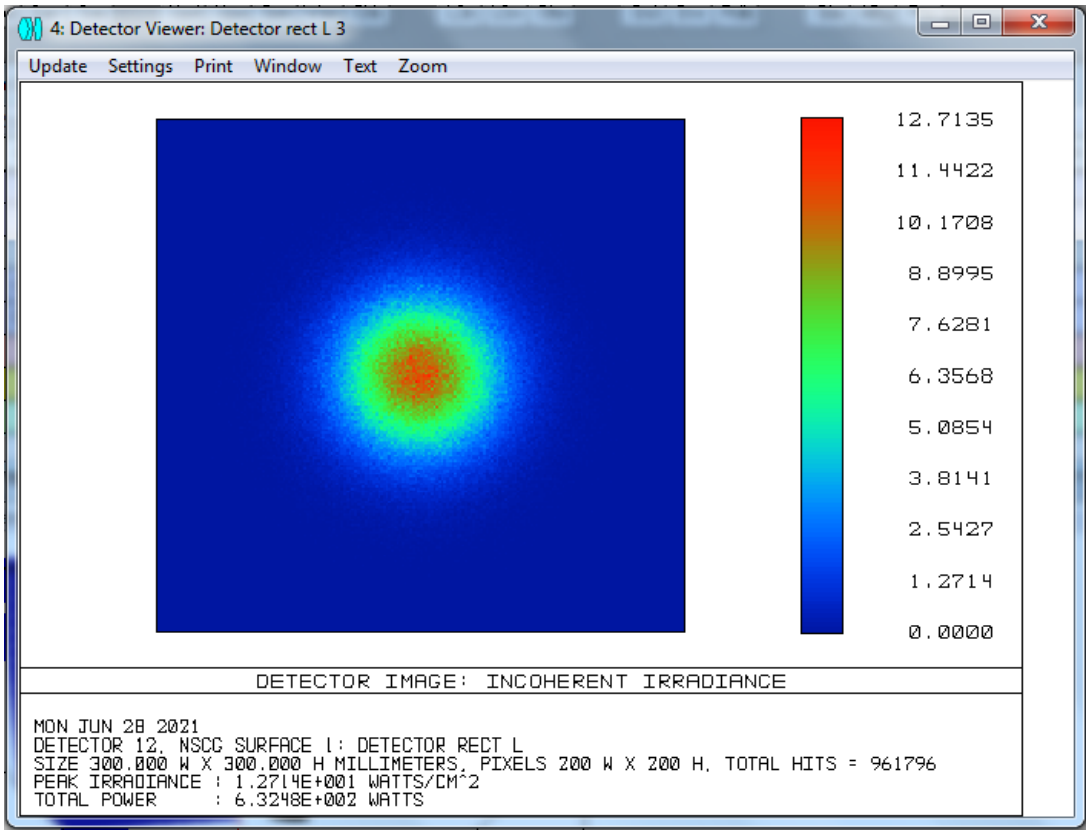
تم تحسين المتغيرات البصرية لنموذج الضخ الشمسي المقترح من خلال برنامج ZEMAX© بنظام التتبع للأشعة غير المتسلسل. تم استخدام الطيف الشمسي القياسي لكتلة الهواء واحد ونصف (AM1.5) كبيانات مرجعية للكشف عن الإشعاع الطيفي (W/ m^2/nm) عند كل طول موجي[101]. تم اعتبار الإشعاع الشمسي الأرضي البالغ 950w/m^2 في برنامج ZEMAX©. تأخذ طاقة الضخ الفعالة لمصدر الضوء في الاعتبار التداخل بنسبة 16% بين طيف الامتصاص لوسط Nd: YAG والطيف الشمسي [102]. يتم أيضًا أخذ نصف الزاوية البالغة 0.271 التي تقابلها الشمس في الاعتبار في التحليل. يتم تضمين طيف امتصاص البولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) والسيليكا والمواد المائية في البيانات الرقمية ZEMAX© لحساب خسائر الامتصاص.

على الرغم من التداخل الصغير بين طيف الامتصاص Nd: YAG والطيف الشمسي ، فقد تم إثبات أن Nd: YAG أفضل مادة تحت الضخ الشمسي نظرًا لخصائصها الفائقة في التوصيل الحراري وكفاءة الكمية العالية والقوة الميكانيكية مقارنة بالمواد المضيفة الأخرى بالنسبة لبلورة الـ YAG الاحادية المطعمة بنسبة 1.0% تم تحديد 22 قمة امتصاص في بيانات ZEMAX© الرقمية. تتم إضافة جميع الأطوال الموجية القصوى ومعاملات الامتصاص الخاصة بها إلى كتالوج الزجاج في برنامج ZEMAX©. يمكن الرجوع إلى قيم الإشعاع الشمسي للأطوال الموجية لامتصاص الذروة البالغ عددها 22 من الأطياف الشمسية القياسية لـ AM1.5 وحفظها كبيانات الطول الموجي للمصدر. أثناء تتبع الشعاع يقسم الوسط الفعال إلى إجمالي 37044 منطقة. تم العثور على طول المسار في كل

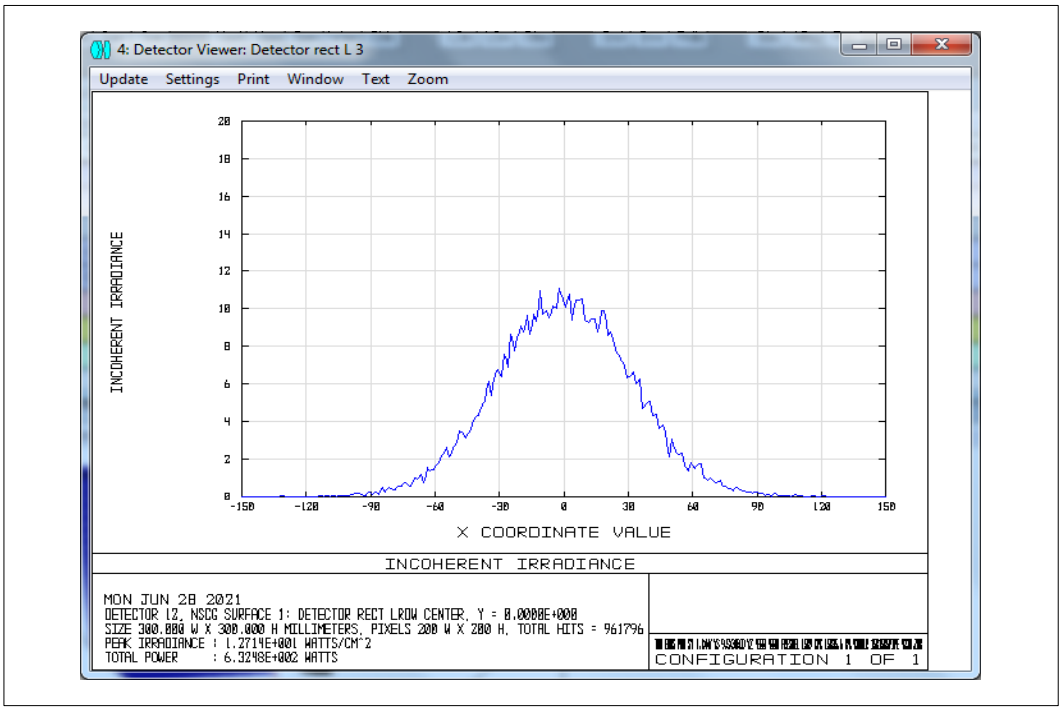
منطقة. بهذه القيمة ومعامل الامتصاص الفعال، يمكن حساب استطاعة امتصاص الطاقة داخل الوسط الفعال عن طريق جمع إشعاع الضخ الممتصة لجميع المناطق.

2.3.5 قياس استطاعة الضخ:

يتم محاكاة ضوء الشمس في برنامج ZEMAX© بمصدرين دائريين متناظرين لهما نفس ابعاد عدسات فرينل كما تبينه **الصورة. 13.4**. استطاعة كل مصدر طاقة تقدر بـ 752W. علما ان نفذيه كل عدسة من عدسات فرينل المستخدمة تقدر بـ 88.7% و انعكاسية المرآة المستوية (M_1 و M_2) تقدر بـ 94.7%، فإن استطاعة الضوء المركز عند بؤرة كل عدسة تساوي 632W تقريبا و التي تم قياسها باستعمال كائن الكاشف المستطيل في برنامج ZEMAX© كما تبينه **الصورة. 18.4**. تركز هذه الطاقة في بؤرة دائرية بقطر 190mm كما توضحه **الصورة. 19.4**، و هي اقل بـ 2mm من فتحة المركز الثاني، وتقع على مسافة 620mm من مركز رأس الليزر. اي ان البقعة تكون داخل تجويف المركز الثاني (3D-CPC). اذ تستقبل منظومة رأس الليزر استطاعة ضخ اجمالية تقدر بـ1264W.



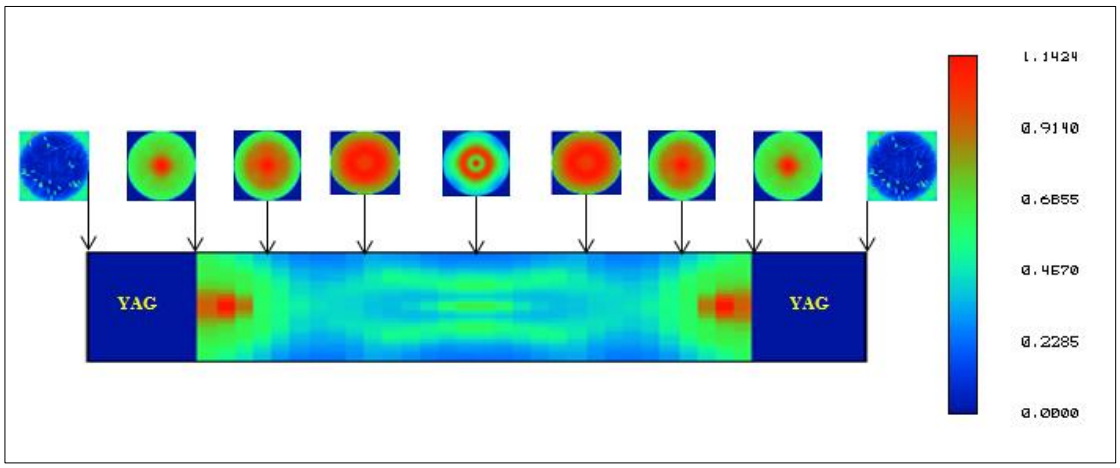
الصورة. 18.4 مقطع عرض لتوزيع الاشعاع عند بؤرة عدسة فرينل .



الصورة. 19.4 مقطع طولي لتوزيع الاشعاع عند بؤرة عدسة فرينل .

3.3.5 قياس استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال وتوزيع طاقة الضخ:

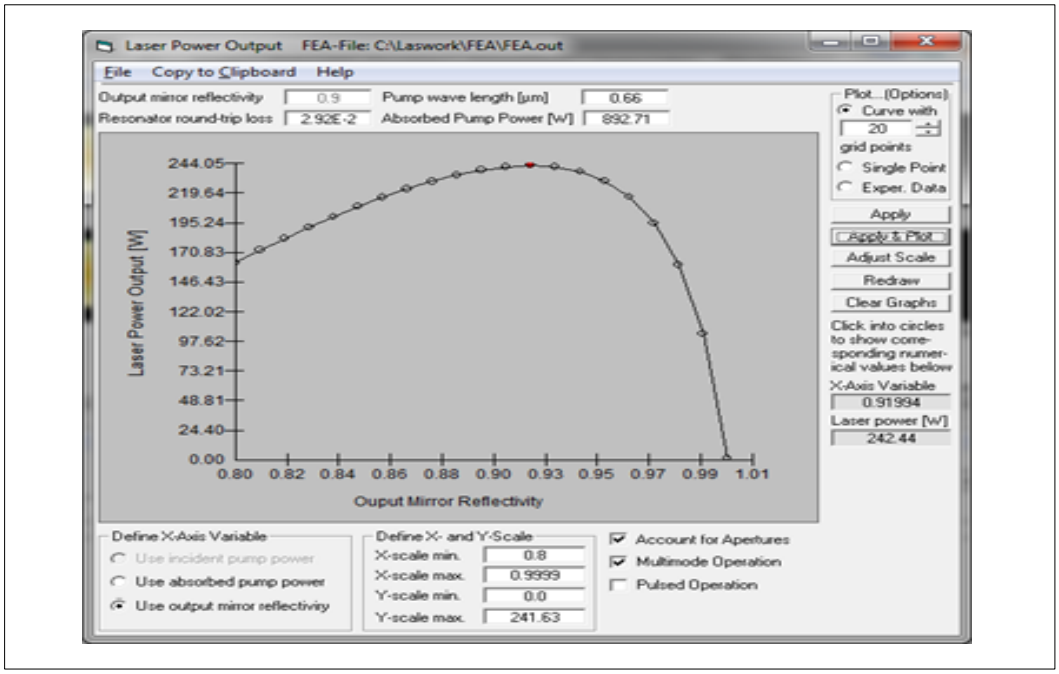
يمكن برنامج ZEMAX© من قياس استطاعة ضخ الطاقة الممتصة في الوسط الفعال و معرفة طريقة توزيعها، وذلك من خلال كائنات الكاشف الحجمي. تبين **الصورة. 20.4** توزيع طاقة الضخ في تسعة مقاطع عرضية لوسط الليزر و مقطع طولي واحد. تم تحقيق توزيع طاقة الضخ على طول الوسط الفعال و بشكل متناظر. و تقدر استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال بـ923W اي بنسبة 73% من الاستطاعة في بؤرة عدسة فرينل. و بنسبة 61.4% من استطاعة المصدر. اي ان نسبة الطاقة الضائعة داخل رأس الليزر 27%، تقابل استطاعة تساوي 341.3W اي حوالي 170.5W ضياع في كل جانب. من اجل تحديد المكان الذي يحدث فيها اكثر ضياع في رأس الليزر، تم اجراء قياس الاستطاعة في نهاية 3D-CPC فوجدناها 595W . بعد ذلك تم قياس الاستطاعة عند فتحة الادخال للتجويف البصري المخروطي فكانت القيمة 562W، اي ان الضياع قبل التجويف البصري يساوي 70W. و الضياع داخله يساوي حوالي 100W. و هي قيمة تمثل 18% من الاستطاعة عند التجويف البصري و هي قيمة صغيرة و لا يمكن استرجاعها نتيجة للضياع الذي يحدث على سطح المرآة المخروطية و ماء التبريد. اي يمكن القول ان وسط الليزر امتص اقصى طاقة ممكن، بعد حساب الضياع الذي يحدث في مختلف اجزاء المنظومة.



الصورة. 20.4 توزيع طاقة الضخ الممتصة في الوسط الفعال بمقطع طولي واحد و تسعة مقاطع عرضية متناظرة.

4.5 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD©:

تتم معالجة بيانات تدفق طاقة الضخ الممتصة من تحليل ZEMAX© بواسطة برنامج LASCAD© لدراسة ثوابت شعاع الليزر وتحديد التأثيرات الحرارية المطبقة في الوسط الفعال للعثور على أفضل متغيرات حزمة الليزر الصادرة. بلغت طاقة الليزر الصادر متعدد الانماط 242.44W كما تبينه **الصورة. 21.4**، اي بكفاءة تجميع تصل الى $30.3W/m^2$، يمكن ملاحظة ان المنظومة اعطت كفاءة التجميع اكبر بقليل من المجموعة الصينة [18] التي استخدمت عدسة فرينل بنفس المساحة و بطاقة مضاعفة. نسبة التحويل من ضوء الشمس الى ضوء ليزر تساوي 3.1%.



الصورة. 21.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير انعكاسية مرآة الاخراج.

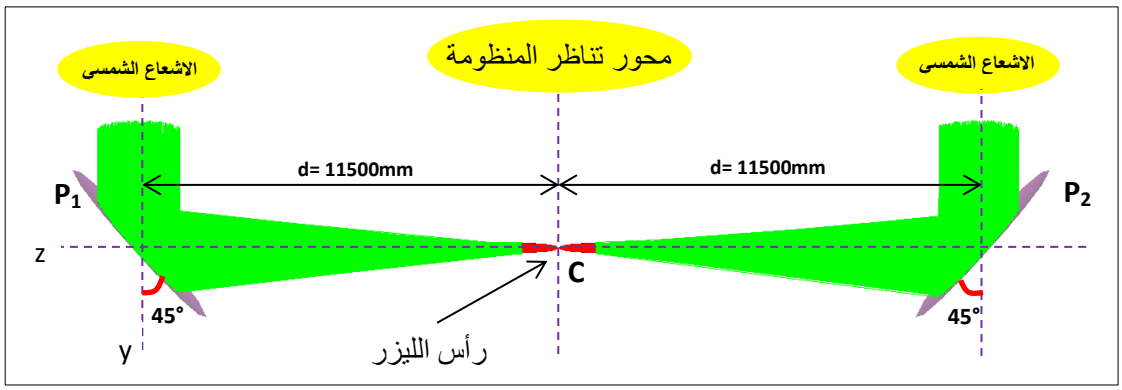
6. منظومة ضخ الليزر الشمسي بمرآتين مكافئتين خارج المحور (off-axis parabolic mirror):

تتكون منظومة الضخ الثانية من مركزين اوليين عبارة عن مرآتين مكافئتين خارج المحور(**off-axis parabolic mirror**). اعـطت المـرايا المكافئة قيـم قياسية خلال السنوات الاخيرة الماضية كما تبينه الجداول (2.3) الى (5.3). و تم اختيار هذا النوع من المركزات (Off-axis) لأنها مناسبة لفكرة الضخ المقترحة و هي الضخ من كلا الطرفين حيث تسمح بإعطاء بؤرة تدور بزاوية عن محور ورود الاشعاع، يمكن اختيار الزاوية حسب ما تمليه الضرورة.

تمت محاكاة منظومة الليزر الشمسي الثانية باستخدام برنامج ZEMAX© و برنامج LASCAD©. بعد اجراء العديد من التغييرات على كل عناصر المنظومة وتجريب العديد من وسائط الليزر ذات ابعاد مختلفة و محاولة تجاوز كل العقبات التي تؤدي الى مزيد من ضياع طاقة الضخ او تحول دون جعل المنظومة قابلة للتطبيق العملي. تم الوصول الى منظومة نهائية تعطي اقصى طاقة ممتصة لضوء الضخ واقصى طاقة ليزر متعدد الانماط.

1.6 منظومة التركيز الابتدائية باستخدام مرآتين مكافئتين خارج المحور:

يتشكل نهج الليزر الشمسي المتناظر ذو الضخ من كلا الطرفين المقترح في **الصورة. 22.4** من مرآتين مكافئتين خارج المحور (P_2 , P_1)، والتي تجمع وتركز الإشعاع الشمسي باتجاه رأس الليزر الموجود في منطقة بؤرية مشتركة.تبلغ فتحة كل مرآة على المحور (y) 3.4m و الفتحة على المحور (x) 2.4m. تميل كل مرآة بزاوية 45° على المحور البصري لمنظومة التركيز الثانية المحور(z)، حيث يسمح ذلك بتحويل الاشعاع بزاوية 90° عن محور وروده المحور (y). تم أخذ مساحة المنبع الإجمالية البالغة 8 أمتـــار مربعة بعين الاعتبـــار. يتم وضـــع مركز كـــل مرآة على بعد 11500mm من المركز البصري المشترك c.



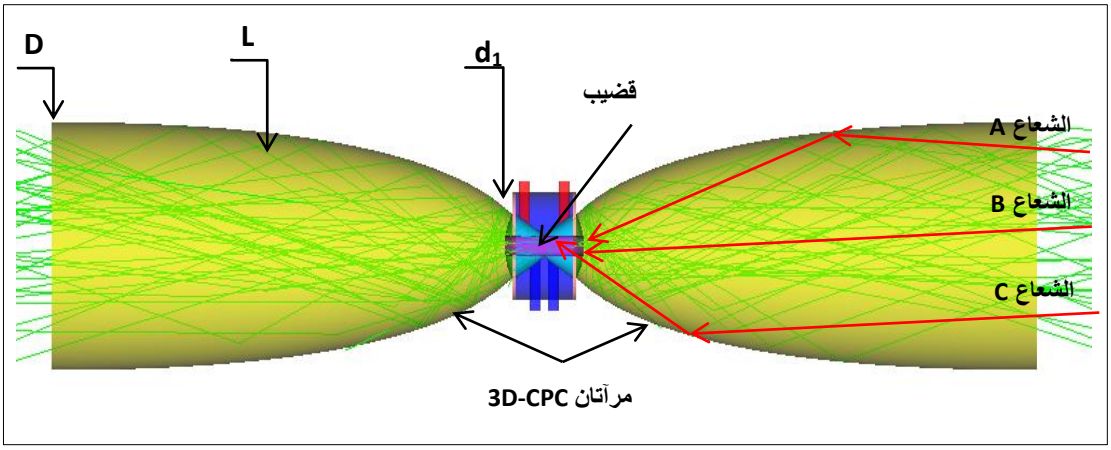
الصورة. 22.4 منظومة التركيز الابتدائية مكونة من مرآتين مكافئتين خارج المحور P_1 و P_2.

2.6 رأس الليزر:

يتكون رأس الليزر الشمسي من منظومتي تركيز ثانية و ثالثة و كذلك تجويف بصري عبار عن مرآتين مخروطيتين، و كذلك منظومة للتبريد، يتم غلق التجويف البصري بغطاءين من السيليكا سمكهما 2mm لمنع تسرب ماء التبريد.

1.2.6 منظومة التركيز الثانية 3D-CPC:

منظومة التركيز الثانية موضحة في **الصورة. 23.4**، و هي عبارة عن مرآتين من نوع 3D-CPC. تسمح هاتين المرآتين بزيادة تركيز الاشعاع الشمسي المركز بواسطة المركزين الابتدائيين نحو وسط الليزر ND :YAG ذو الابعاد الصغيرة. تبلغ فتحة كل مرآة $D_1 = 244mm$، و بفتحة اخراج تقدر بـ $d_1 = 30mm$ و طول يبلغ $L_1 =$ 1000mm، وزاوية قبول صغيرة تساوي $\theta = 7°$.



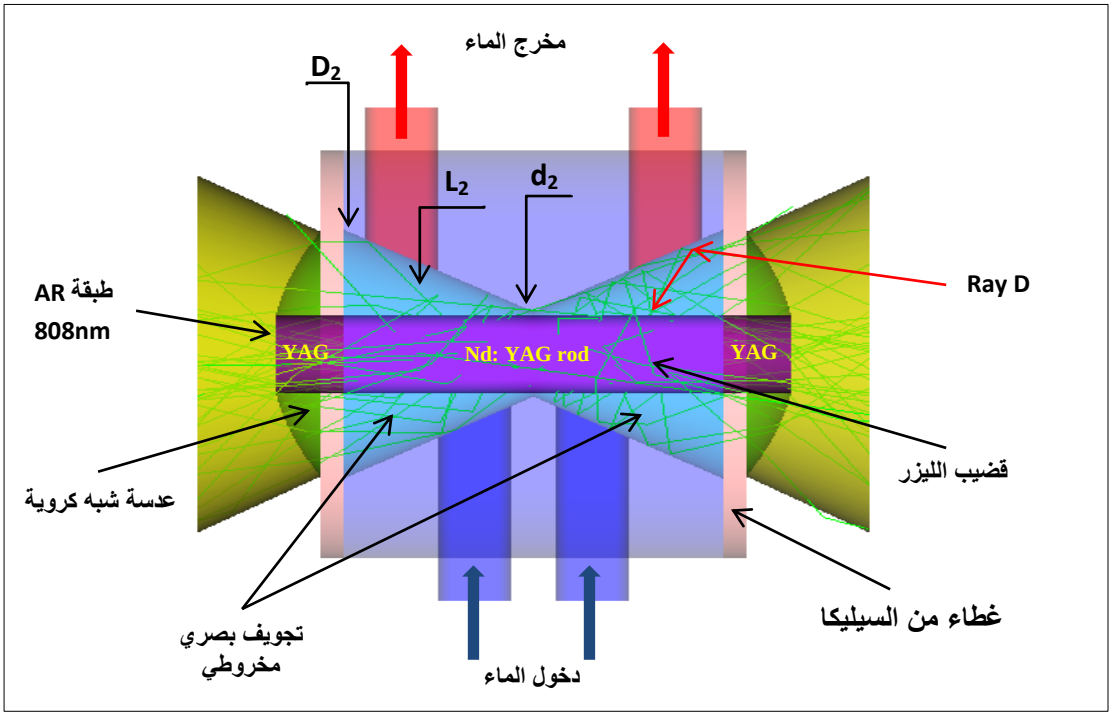
الصورة. 23.4 رأس الليزر مكون من مرآتين من نوع 3D-CPC و عدسة من السيليكا و تجويف ضخ عبارة عن مرآتين مخروطيتين.

يتبع الاشعاع المركز داخل مرآة 2D-CPC اربع مسارات ممكنة قبل الوصول الى وسط الليزر و هي A، B، C، D الموضحة في **الصورتين 23.4 و 24.4**.

2.2.6 منظومة التركيز الثالثة:

لزيادة تركيز الاشعاع نحو وسط الليزر الاسطواني تم اضافة مركز ثالث عند مخرج مرآة 3D-CPC كما توضحه **الصورة. 24.4**. و هو عبارة عن عدسة مثقوبة من السيليكا بفتحة كبيرة تساوي 30mm و فتحة صغيرة 9.5mm و نصف قطر انحناء يساوي R = 35.8mm و سمك 4.42mm ، السيليكا المنصهرة مادة بصرية مثالية لضخ ليزر Nd :YAG، لأنها شفاف على طيف الامتصاص Nd: YAG. تتميز بنقطة تليين عالية ومقاومة للخدش والصدمات الحرارية مما يجعلها مناسبة جدًا لضخ الطاقة الشمسية فائقة الطاقة. يمكن تصنيع مركزات

السيليكا المنصهرة عالية الجودة البصرية (99.999٪) عن طريق المعالجة بالآلات البصرية والتلميع. تعمل هذه العدسة كمثبت لوسط الليزر و ذلك باستخدام غراء بصري.



الصورة. 24.4 منظومة التركيز الثالثة و التجويف البصري و منظومة التبريد.

3.2.6 غطاء من السيليكا:

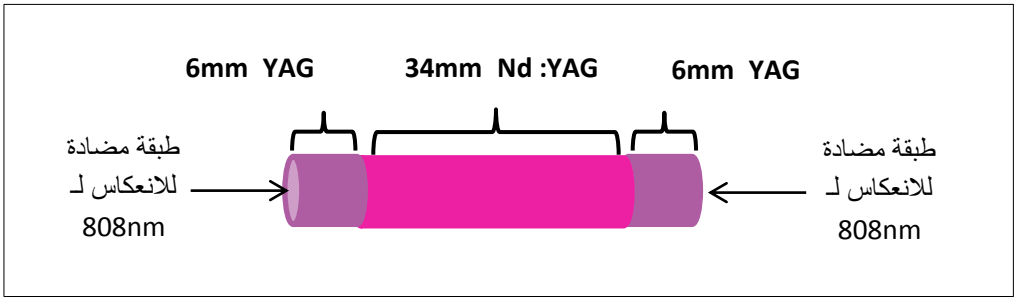
سمكه 2mm به ثقب قطره 9.5mm. و هو مبين في **الصورة. 24.4**. الهدف منه منع تسرب ماء التبريد و كذلك زيادة تثبيت قضيب الليزر باستخدام غراء بصري.

4.2.6 التجويف البصري:

و هو عبارة عن مرأتين مخروطيتين كما تبينه الصورة. 24.4 ابعاد كل منهما $D_2 = 30.6mm$، و $d_2 =$ 10.4mm، $L_2 = 17mm$. تسمح هاتين المرآتين بتوجيه جزء من الاشعاع نحو السطح الجانبي لوسط الليزر، كما تسمح بعبور ماء التبريد.

5.2.6 وسط الليزر:

تضخ هذه المنظومة قضيب من YAG/Nd: YAG/YAG كما تبينه **الصورة. 24.4 و الصورة. 25.4** قطره 9.5mm و طول كل قطعة من YAG تساوي 6mm و طول جزء الـYAG: Nd 34mm اي طوله كاملا 46mm، يتم تثبيته بواسطة غراء بصري من جزئه YAG في ثقبي الغطاء و العدسة. كما يتم طلاء نهايتيه بطبقة مضادة للانعكاس للطول الموجي لضوء الضخ من السيليكا سمكها 3µm.



الصورة. 25.4 وسط الليزر مكون من YAG / YAG: Nd / YAG.

6.2.6 منظومة التبريد:

يتم تبريد كل جزء من وسط الليزر على حدى و ذلك باستخدام اربعة انابيب كما تبينه **الصورة. 24.4** قطر كل منها 6.5mm.

3.6 التحليل العددي لأداء منظومة الليزر الشمسي الثانية:

1.3.6 نتائج المحاكاة ببرنامج ZEMAX©:

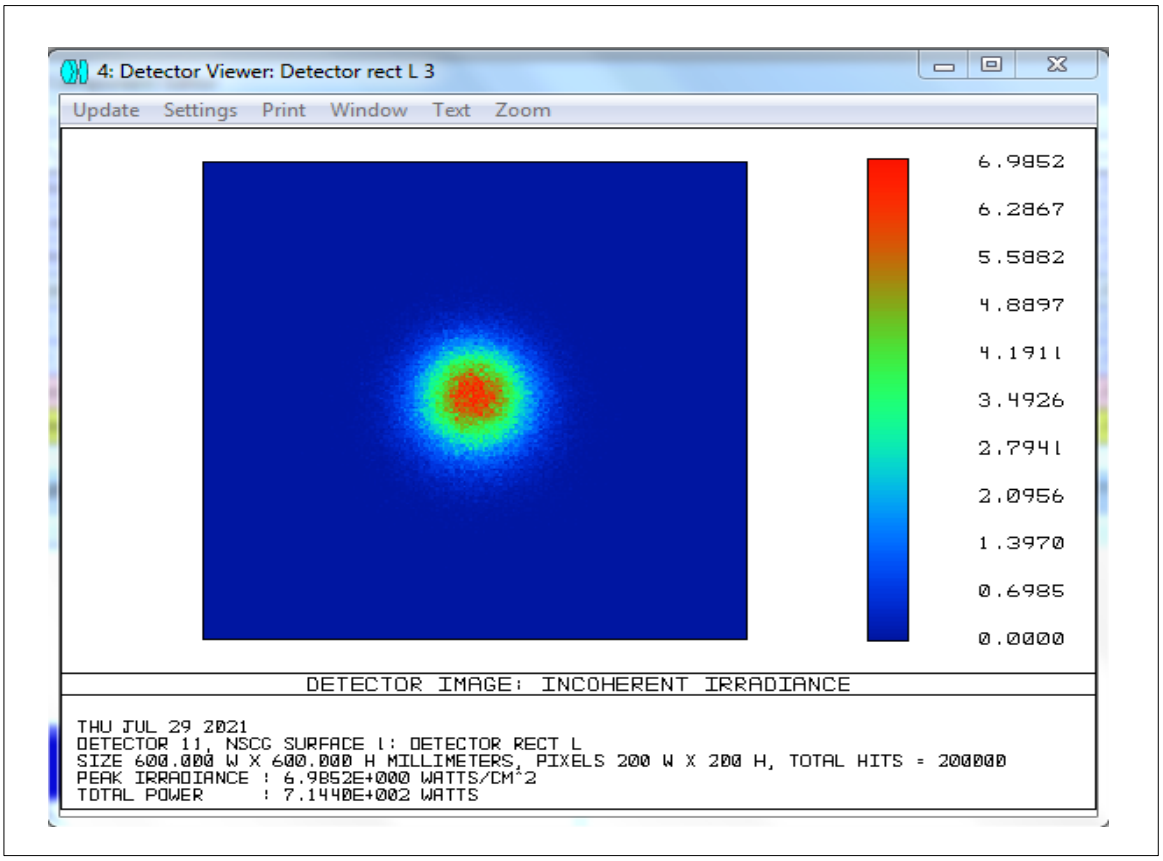
تم تحسين المتغيرات البصرية لنموذج الضخ الشمسي الثاني بمرآة مكافئة خارج المحور المقترح من خلال برنامج ZEMAX© بنظام التتبع للأشعة غير المتسلسل. تم استخدام الطيف الشمسي القياسي لكتلة الهواء واحد ونصف (AM1.5) كبيانات مرجعية للكشف عن الإشعاع الطيفي ($W/ m^2/ nm$) عند كل طول موجي[101]. تم اعتبار الإشعاع الشمسي الأرضي البالغ $950w/m^2$ في برنامج ZEMAX©. تأخذ طاقة الضخ الفعالة لمصدر الضوء في الاعتبار التداخل بنسبة 16% بين طيف الامتصاص لوسط Nd: YAG والطيف الشمسي [102]. يتم أيضًا أخذ نصف الزاوية البالغة 0.271 التي تقابلها الشمس في الاعتبار في التحليل. يتم تضمين طيف امتصاص البولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) والسيليكا والمواد المائية في البيانات الرقمية ZEMAX© لحساب خسائر الامتصاص.

على الرغم من التداخل الصغير بين طيف الامتصاص Nd: YAG والطيف الشمسي، فقد تم إثبات أن Nd: YAG أفضل مادة تحت الضخ الشمسي نظرًا لخصائصها الفائقة في التوصيل الحراري وكفاءة الكمية العالية والقوة الميكانيكية مقارنة بالمواد المضيفة الأخرى بالنسبة لبلورة الـ YAG الاحادية المطعمة بنسبة 1.0% تم تحديد 22 قمة امتصاص في بيانات ZEMAX© الرقمية. تتم إضافة جميع الأطوال الموجية القصوى ومعاملات الامتصاص الخاصة بها إلى كتالوج الزجاج في برنامج ZEMAX©. يمكن الرجوع إلى قيم الإشعاع الشمسي للأطوال الموجية لامتصاص الذروة البالغ عددها 22 من الأطياف الشمسية القياسية لـ AM1.5 وحفظها كبيانات الطول الموجي للمصدر. أثناء تتبع الشعاع، يقسم الوسط الفعال إلى إجمالي 37044 منطقة. تم العثور على طول المسار في كل

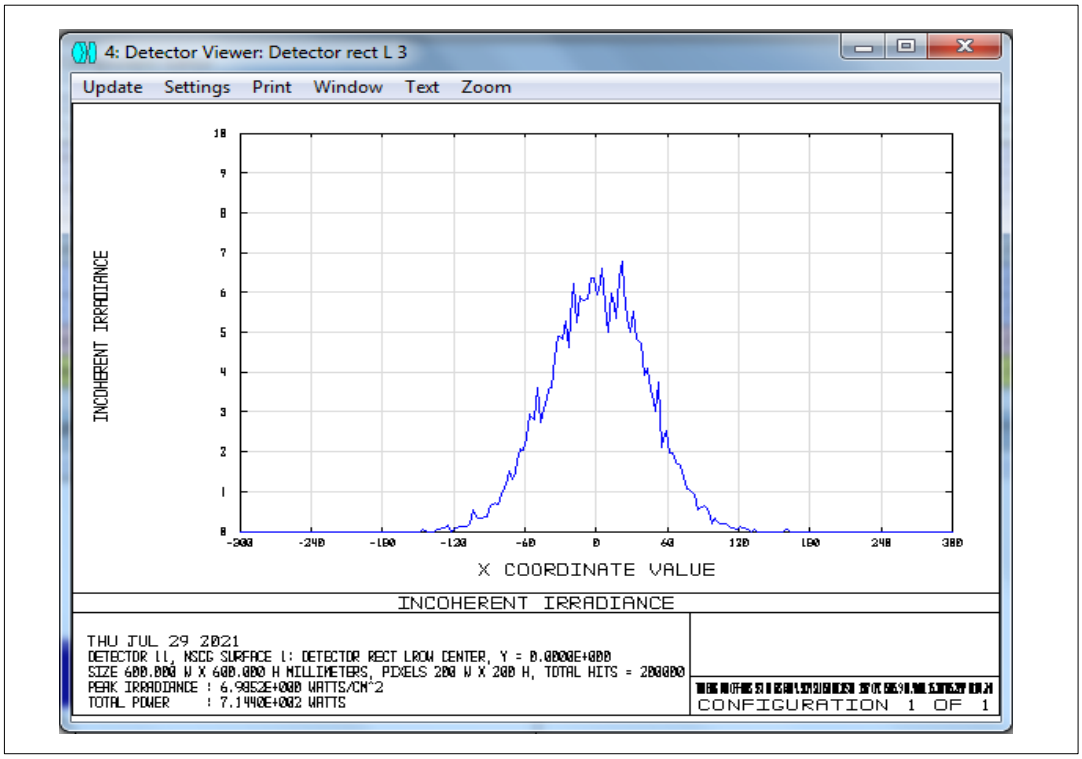
منطقة. بهذه القيمة ومعامل الامتصاص الفعال، يمكن حساب الطاقة الممتصة داخل وسط الليزر عن طريق جمع إشعاع الضخ الممتصة لجميع المناطق.

2.3.6 قياس استطاعة الضخ:

يتم محاكاة ضوء الشمس في برنامج ZEMAX© بمصدرين دائريين متناظرين لهما نفس ابعاد عدسات فرينل في المنظومة الاول كما تبينه **الصورة. 22.4** استطاعة كل مصدر تقدر بـ 752W. علما ان انعكاسية كل مرآة مكافئة خارج المحور تقدر بـ 95%، فإن استطاعة تركيز الطاقة عند بؤرة كل مرآة تساوي 714W تقريبا و التي تم قياسها باستعمال كائن الكاشف المستطيل في برنامج ZEMAX© كما تبينه **الصورة. 26.4** تركز هذه الطاقة في بؤرة دائرية بقطر 280mm كما توضحه **الصورة. 27.4** ، وتقع على مسافة 1100mm من مركز رأس الليزر. اي ان البقعة تكون داخل تجويف المركز الثاني (3D-CPC). اذن تستقبل منظومة رأس الليزر استطاعة ضخ اجمالية تقدر بـ1428W.



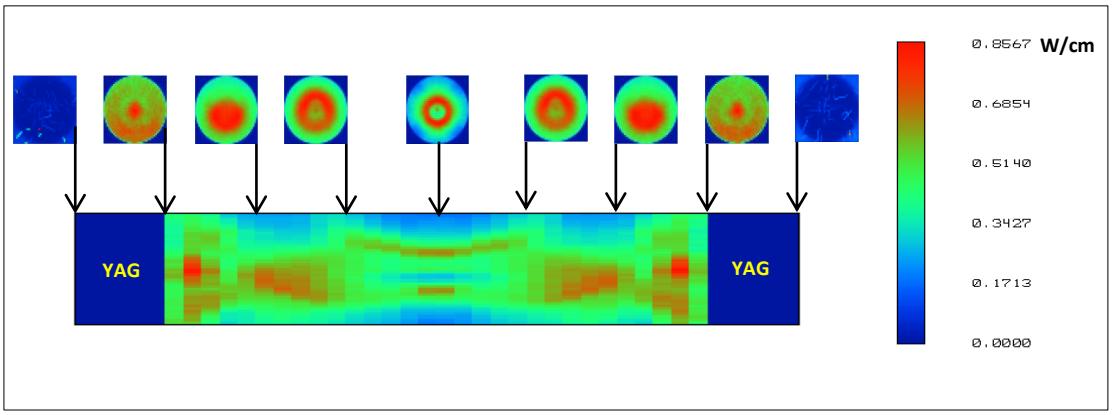
الصورة. 26.4 مقطع عرض لتوزيع الاشعاع عند بؤرة المرآة القطعية المكافئة .



الصورة. 27.4 مقطع طولي لتوزيع الاشعاع عند بؤرة المرآة القطعية المكافئة .

3.3.6 قياس استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال وتوزيع طاقة الضخ:

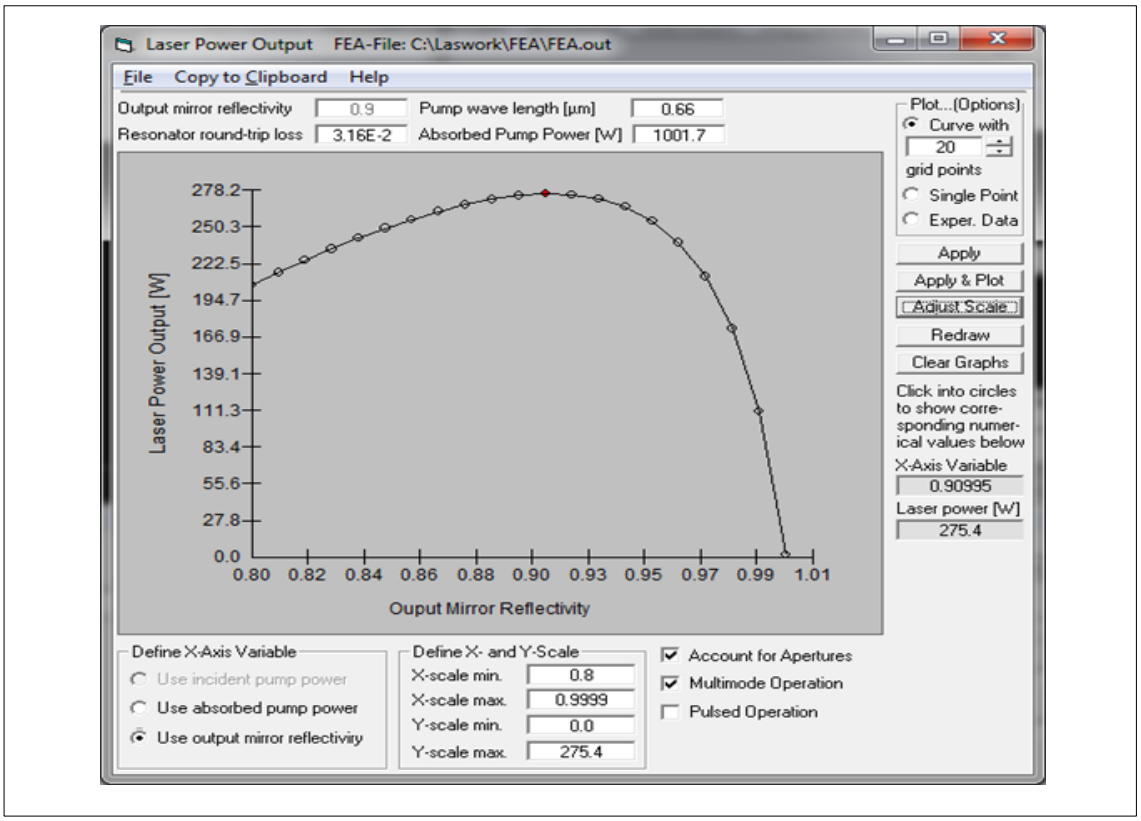
يمكن برنامج ZEMAX© من قياس استطاعة الامتصاص في الوسط الفعال و معرفة طريقة توزيع طاقة الضخ الممتصة، وذلك من خلال كائنات الكاشف الحجمي. تبين **الصورة. 28.4** توزيع طاقة الضخ في تسعة مقاطع عرضية للوسط الفعال و مقطع طولي واحد. تم تحقيق توزيع طاقة الضخ على طول الوسط الفعال و بشكل متناظر. و تقدر استطاعة امتصاص الطاقة في الوسط الفعال بـ1010W اي بنسبة 71% من الاستطاعة عند بؤرة كل مرآة مكافئة، و بنسبة 67% من استطاعة المصدر. اي ان نسبة الضياع داخل رأس الليزر 29%، تقابل قيمة استطاعة تساوي 418W اي حوالي 209W ضياع في كل جانب. من اجل تحديد المكان الذي يحدث فيها اكثر ضياع في رأس الليزر، تم اجراء قياس الاستطاعة في نهاية 3D-CPC فوجدناها 564W . اي ان الضياع قبل التجويف البصري يساوي 150W. اي ان الضياع داخله يساوي حوالي 59W. و هي قيمة تمثل 10% من الاستطاعة عند التجويف البصري و هي قيمة صغيرة و لا يمكن استرجاعها نتيجة للضياعات التي تحدث على سطح المرآة المخروطية و ماء التبريد. اي يمكن القول ان الوسط الفعال امتص اقصى طاقة ممكن، بعد حساب كل الضياعات التي تحدث في مختلف اجزاء المنظومة.



الصورة. 28.4 توزيع طاقة الضخ الممتصة في الوسط الفعال بمقطع طولي واحد و تسعة مقاطع عرضية متناظرة.

4.6 نتائج المحاكاة ببرنامج LASCAD©:

تتم معالجة بيانات تدفق طاقة الضخ الممتصة من تحليل ZEMAX© بواسطة برنامج LASCAD© لدراسة معلمات شعاع الليزر وتحديد التأثيرات الحرارية المطبقة في الوسط الفعال للعثور على أفضل متغيرات حزمة الليزر الصادرة. بلغت طاقة الليزر الصادر متعدد الانماط 275.4W كما تبينه **الصورة. 29.4**، اي بكفاءة تجميع تصل الى $34.4W/m^2$. نسبة التحويل من ضوء الشمس الى ضوء ليزر تساوي 3.6%.



الصورة. 29.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير انعكاسية مرآة الاخراج.

7. مناقشة نتائج محاكاة المنظومتين و مقارنتها:

مرت عملية محاكاة و تحسين منظومتي الليزر الشمسي المقترحتين بعدة مراحل و كان اهمها هو اختيار ابعاد عدستي فرينل المناسبة. لقد تم اختيار عدسة فرينل بمساحة $4m^2$ اي بقطر حوالي 2.26m لسببين رئيسيين هما: التوفر التجاري لعدسات فرينل بمساحة $4m^2$، ما يسهل التحقيق العملي للمنظومة المقترحة مستقبلا، و الثاني سهولة المقارنة مع الابحاث السابقة و التي اعتمدت عدسات فرينل بنفس المساحة [18]. لكن في الحقيقة يمكن توسيع مساحة التجميع للمنظومة الاولى و ذلك لوجود مساحة كافية بين عناصر المنظومة، حيث يمكن زيادة قطر عدستي فرينل الى 6.2m اي بمساحة تصل الى $30m^2$ مما يرفع استطاعة الضخ من 752W الى 5.64KW لكل منبع، اي يمكن مضاعفة استطاعة كل منبع بـ 7.5 مرة دون حدوث تلامس او تداخل بين عناصر المنظومة و هذا من شأنه مضاعفة طاقة الليزر الناتجة و هو امر مرغوب للعديد من تطبيقات الليزر مثل دورة المغنيسيوم (Mg) - الهيدروجين (H_2) المتجددة. اما بخصوص المنظومة الثانية و في هذا السياق فاختيار ابعاد المرآة المكافئة خارج المحور تم لنفس الاسباب المذكورة سابقا، بالإضافة الى مقارنة اداء المركزين الاولين و هما بنفس مساحة التجميع الفعالة، تجدر الاشارة هنا الى ان توسيع مساحة التركيز الابتدائية ممكنة بشكل اكبر مما هو عليه بالنسبة للمنظومة الاولى و لا يحد ذلك الا زاوية القبول للمركز الثاني 3D-CPC لان تغيير ابعاد المرايا المكافئة خارج المحور يؤثر بشكل كبير على شكل البؤرة اي على التوزيع المنتظم للإشعاع في البؤرة، مما يتطلب اعادة تحسينها بتغيير انحناء سطح المركز.

يمكن لعدسة فرينل تركيز الطاقة الشمسية في بؤرة صغيرة بعرض كامل بنصف الحد الأقصى (Full Width at Half Maximum) يساوي 70mm مع توزيع شبه غاوسي كما تبينه **الصورة. 19.4** لتصل الى ذروة التدفق البالغة $1.27W/cm^2$، و باستطاعة 632W لكل عدسة اي باستطاعة اجمالية 1264W .افرزت عملية المحاكاة بعد بؤري مناسب يقدر بـ 8.2m يعطي اقصى طاقة ممتصة من طرف قضيب الليزر. رغم ان زيادة البعد البؤري لعدسة فرينل يؤثر سلبا على تركيز الاشعاع في بؤرتها الا انه يزيد من نفاذيتها الى حد ما مما يزيد من طاقة الاشعاع الموجه نحو رأس الليزر. من جهة اخرى يعتمد الطول البؤري لعدسة فرينل بشكل كبير على الطول الموجي للطيف الشمسي، خاصة في الأشعة فوق البنفسجية والمنطقة المرئية ويصبح مشبعًا تقريبًا في منطقة NIR [103]، الاختلاف الشديد في الطول البؤري يتسبب في تشتت كبير للإشعاعات الشمسية المركزة على طول المحور البصري لعدسة فرينل. هذا يفسر سبب استخدام مركّزات 3D-CPC ذات طول كبير نوعا ما 650mm، لتركيز جميع إشعاعات الضخ الشمسي المفيدة تقريبًا ضمن نطاق 900nm -500 (قيمة جدًا لضخ قضيب Nd: YAG).

تسمح المرايا المكافئة بتحقيق تركيز محكم للإشعاع الشمسي الوارد في بؤرة دائرية صغيرة مهما كان قطر فتحتها و نصف قطر انحنائها، الا ان المرايا المكافئة خارج المحور تحتاج لعملية محاكاة لتحسين شكل بؤرتها و هذا

يرتبط بقطر فتحتها و نصف قطر انحنائها و كذلك زاوية ميلانها، ان عملية تحسين بؤرة هذا المركز كانت من اهم المشاكل التي جابهتنا خلال المحاكاة نظرا لمساحته المعتبرة. و لذلك و للحصول على بؤرة بتوزيع شبه غاوسي كما تبينه الصورتين (26.4) و (27.4) باستخدام المرايا المكافئة خارج المحور بمساحة فعالة $4m^2$ و بزاوية دوران °45، تم تحديد نصف قطر انحناء سطح المرآة على المحور x يساوي 14m و على المحور y 28m. تم قياس البعد البؤري لكل مرآة 10.4m، هذا البعد البؤري كبير نوعا ما الا انه اعطي بؤرة دائرية صغيرة كما تبينه الصورة. 27.4 و بأقصى طاقة ممتصة لقضيب الليزر. هذه البؤرة بعرض كامل بنصف الحد الأقصى (Full Width at Half Maximum) يساوي 90mm مع توزيع شبه غاوسي، لتصل الى ذروة التدفق البالغة $7W/cm^2$، و باستطاعة 714W لكل عدسة اي باستطاعة اجمالية 1428W.

ان الخطوة المهمة الثانية التي تم مجابهتها خلال عملية محاكاة منظومتي الليزر الشمسي هي اختيار و تحسين ابعاد قضيب الليزر، حيث تم اختيار قضيب ليزر بشكل خاص و هو قضيب من YAG/Nd :YAG/YAG اي مكون من طرفين من الـ YAG غير المطعم بالنيوديميوم. تم استخدام فكرة الطرف غير المطعم اول مرة من قبل Z. Guan و من معه سنة 2018 [45]. تلعب قطعتي الـ YAG ثلاثة ادوار رئيسية: (1) نتيجة لعدم تطعيم هاتين القطعتين بالنيوديميوم لا يحدث تراكم للإشعاع في طرفي القضيب مما يمنع حدوث تشوه لطرف القضيب، (2) يمنع الطرفين غير المطعمين و الملامسين للهواء مباشرة امتصاص طاقة فوتونات الليزر اثناء تذبذبها بين مرأتين المرنانة من طرف ماء التبريد او مادة المركزات المستعملة (السيليكا)، (3) يعمل الطرفين غير المطعمين كمثبتين لقضيب الليزر و يتم ذلك باستعمال غراء بصري مناسب كما تم شرحه في الفقرتين 5 و 6 من هذا الفصل. ادى استخدام الطرفين غير المطعمين الى بعض المشاكل نذكر منها: الحد من زيادة طول قضيب الليزر، فهذين الطرفين لا يساهمان في انتاج فوتونات الليزر من جهة، ومن جهة اخرى يزيدان من خسائر حزمة الليزر خلال تذبذبه بين مرآتي المرنانة. ايضا و نتيجة لملامسة الطرفين غير المطعمين للهواء و بسبب الفارق المعتبر بين قرينة انكسار الـ YAG و التي تساوي 1.83 و الهواء 1 يحدث ضياع جزء لا يستهان به من طاقة الضخ في كلا الطرفين، تم الحد من تأثير هذا المشكل بطلي سطحي القطعتين غير المطعمتين بطبقة رقيقة من السيليكا قرينة انكسارها 1.46، و سمكها 3µm تعمل كطبقة مضادة للانعكاس لضوء الضخ. زاد هذا الحل الطاقة الممتصة في وسط الليزر بشكل معتبر.

ان الشروط التي افرزتها طريقة الضخ من كلا الطرفين على شكل وسط الليزر حتمت علينا استخدام مركز ثاني مجوف و هو عبارة عن مركز مركب مكافئة ثلاثي الابعاد 3D-CPC. مع عدم امكانية استخدام مركزات انكسارية مملوءة من السيليكا سواء كانت عدسات او ادلة موجية و هي الاكثر استخداما في طريقة الضخ من الطرف، حيث تعتبر السيليكا المنصهرة مادة بصرية مثالية لضخ الليزر الشمسي، لأنها شفافة بالقرب من طيف الامتصاص Nd: YAG. تتميز بنقطة انصهار عالية ومقاومة للخدش والصدمات الحرارية، مما يجعلها مناسبة جدًا لتطبيقات ضخ الطاقة الشمسية فائقة الطاقة. يمكن تصنيع مركّزات السيليكا المنصهرة عالية الجودة

(99.999٪) عن طريق المعالجة بالآلات البصرية والتلميع. تؤدي المركزات الانكسارية الى ضياع كبير في طاقة الضخ الا انها في المقابل تعطي تركيزا كبيرا و هو امر مطلوب جدا في ضخ منظومات الليزر الشمسي. في حين يسلك مركز مرآة 3D-CPC سلوكا معاكسا فهو يتمتع بانعكاسية كبيرة و تركيز اقل، هذا ما يفسر دعمنا لمنظومة التركيز الثانية بمركز ثالث عبارة عن عدسة شبه كروية رقيقة من السيليكا بها ثقب و ذلك لزيادة تركيز الاشعاع على وسط الليزر.

تم اقتراح تجويف بصري عبارة عن مرآتين مخروطيتين و هو التجويف الشائع الاستعمال في منظومات الضخ الطرفي، و الاكثر كفاءة في التوزيع و التركيز الاضافي لضوء المضخة نحو السطح الجانبي لقضيب الليزر. تم غلق فتحة الادخال للتجويف البصري بقرص من السليكا مثقوب سمكه 2mm، يعمل ثقبه كماسك لقضيب الليزر باستعمال غراء بصري. يعمل التجويف البصري كممر لماء التبريد ايضا.

ترتبط عملية الضخ البصري في مادة ليزر صلبة بتوليد الحرارة لعدد من الأسباب:

(أ) يفقد فرق طاقة الفوتونات بين نطاق المضخة ومستوى الليزر العلوي كحرارة للشبكة المضيفة، وبالمثل فإن فرق الطاقة بين مستوى الليزر الأدنى والحالة الأرضية يتم فقده حراريا.

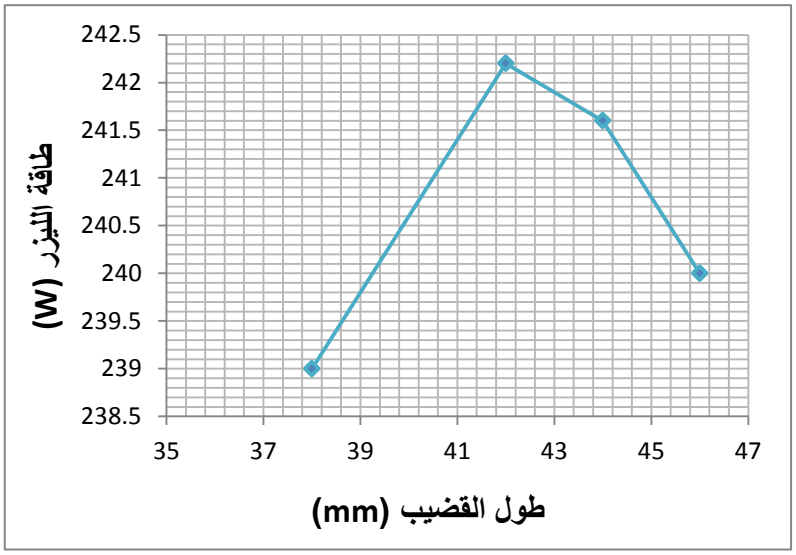
(ب) بالإضافة إلى ذلك، فإن الاسترخاء غير الإشعاعي من مستوى الليزر العلوي إلى الحالة الأرضية، بسبب إخماد التركيز، والاسترخاء غير الإشعاعي من نطاق المضخة إلى الحالة الأرضية سوف يولد حرارة في الوسط النشط.

(ج) في الأنظمة التي يتم ضخها بمصباح وامض (او ضوء الشمس)، يتسبب التوزيع الطيفي الواسع لمصدر المضخة في قدر معين من امتصاص الخلفية بواسطة مادة مضيف الليزر لا سيما في مناطق الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء من طيف المصباح (الشمس) [4].

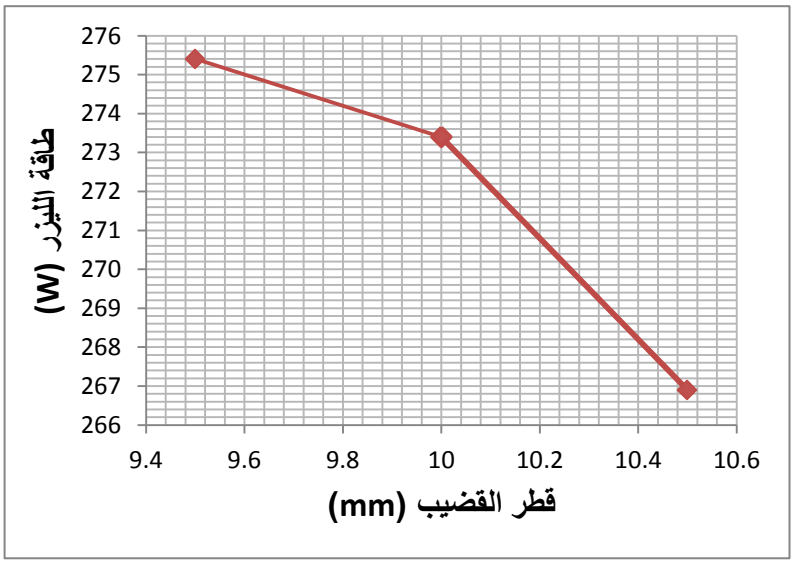
يمكن أن يؤدي امتصاص إشعاع المضخة بواسطة ذرات الشوائب ومراكز الألوان إلى زيادة التسخين. المشكلة الرئيسية التي تعيق طاقة الليزر وجودة سطوع ليزرات الحالة الصلبة التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية هي توليد الحرارة داخل وسط الليزر، مما يؤدي إلى تباين مكاني في درجة الحرارة، وبالتالي الضغوط الداخلية داخل مادة الليزر، وهذا ينطبق بشكل خاص على نهج الضخ الطرفي. حيث يتسبب توزيع المضخة غير المنتظم في كثافة ترسيب عالية جدًا للمضخة، وبالتالي كثافة تحميل حرارية عالية، مما قد يؤدي إلى حدوث كسر في قضيب الليزر [104،105]. حتى في قضيب الليزر المضخ طوليا المبرد بالماء، لوحظ زيادة الإجهاد بالقرب من مركز السطح الذي تم ضخه [105]، والذي قد يكون أمرا بالغ الأهمية للتلف البلوري في تطبيقات الليزر عالية الطاقة. عادة ما تهيمن الإزالة الفعالة للحرارة وتقليل التأثيرات الحرارية التي تسببها تدرجات درجة الحرارة عبر المنطقة النشطة لوسط الليزر على اعتبارات التصميم للأنظمة الليزر المضخ بالشمس. لذى و لان نهج الضخ المقترح و الذي يعتبر منظومة ضخ مضاعفة، تم تصميم منظومة تبريد مزدوجة تعمل على تبريد وسط الليزر كل نصف على حدى. و

هي مكونة من اربعة انابيب لها نفس القطر 6.5mm اثنان منها قريبين من وسط قضيب الليزر و الاخران قريبين من طرفي القضيب، وذلك من اجل ضمان تبريد كامل لقضيب الليزر. يعمل ماء التبريد دور آخر وهو ضمان الربط الجيد لطاقة الضخ بين منظومة التركيز و سط الليزر.

خلصت عملية المحاكاة و التحسين باستخدام برنامجي ZEMAX© و LASCAD© الى منظومتي الليزر الشمسي الموصوفتين في الفقرتين 5 و 6 بقضيب ليزر بقطر 9.5mm لكلا من المنظومتين و بطول كامل 42mm للمنظومة الاولى بعدسة فرينل، و 46mm للمنظومة الثانية. ابعاد قضيب الليزر هاته هي الابعاد المثالية لنهج الضخ المقترح و التي تعطي اقصى طاقة ليزر لكلا المنظومتين، كما هو موضح في الصورتين (30.4) و (31.4).



الصورة. 30.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير طول قضيب الليزر الاجمالي لمنظومة عدسة فرينل.



الصورة. 31.4 تغير طاقة الليزر الصادر بتغير قطر قضيب الليزر لمنظومة المرآة المكافئة .

رأسي الليزر لكلا المنظومتين متماثلين من حيث الشكل و الابعاد مختلفين فقط من حيث زاوية قبول المركز الثاني 3D-CPC، حيث كان زاوية القبول °9 و °7 بالنسبة للمنظومتين الاولى و الثانية على التوالي. يمكن تفسير هذا الاختلاف باختلاف البعد البؤري للمركزين الاولين و الذي ترتبط به زاوية قبول المركز الثاني ارتباطا وثيقا.

يلخص الجدول 1.4 مقارنة شاملة بين مختلف متغيرات و نتائج منظومة الليزر الشمسي للمنظومتين المقترحتين بطريقة الضخ الجديدة و منظومات الليزر الشمسي التي اعطت احسن النتائج.

جدول 1.4 – مقارنة بين المنظومتين المقترحتين و منظومات الليزر الشمسي التي اعطت قيم قياسية.

المؤلفون	المركز الاولي	مساحة المركز m^2	الاشعاع الشمسي (W/m^2)	الطاقة الشمسية (W)	طاقة الليزر (W)	كفاءة التحول ضوء - ضوء (%)	كفاءة التجميع (W/m^2)
T. H. Dinh[49]	عدسة فرينل	4	920	3680	120	3.2%	30
Dawei Liang[71]	مرآة مكافئة	1.18	1010	1192	37.2	3.1%	31.5
Z. Guan[76]	عدسة فرينل	1.03	980	1009	33.1	3.2%	32.1
Dawei Liang[79]	مرآة مكافئة	1	870	870	32.5	3.7%	32.5
العمل موضوع الاطروحة	عدسة فرينل	8	950	7600	242.4	3.3%	30.3
	مرآة مكافئة	8	950	7600	275.4	3.6%	34.4

اولا، بمقارنة نتائج المنظومتين يظهر ان المنظومة الثانية تعطي كفاءة تجميع اكبر بـ 1.14 مرة من المنظومة الاولى. احد اسباب هذا الفارق هو ان المنظومة الاولى بعدسات فرينل تحتاج مرايا عاكسة لتوجيه الضوء نحو رأس الليزر، نفاذيتها حوالي 95%، بالإضافة الى نفاذية عدسة فرينل و التي تقدر بـ 89%، اي ان نسبة الطاقة الضائعة قبل رأس الليزر تساوي 15%. في حين ان منظومة المرايا المكافئة خارج المحور يلعب فيها المركز الابتدائي دورين هما تركيز و توجيه الضوء نحو رأس الليزر مع انعكاسية تقدر بـ 95%. اي الطاقة التي تضيع قبل رأس الليزر تقدر بـ 5% فقط.

ثانيا: بمقارنة نتائج المنظومة الاولى مع النتائج القياسية المحققة بعدسة فرينل، يمكن ملاحظة ان المنظومة

اعطت كفاءة تجميع اعلى بقليل من القيمة التي تحصل عليه T. H. Dinh و من معه سنة 2012، هذه المجموع استعملت عدسات فرينل بنفس مساحة العدسات المستخدمة في المنظومة الاولى $4m^2$. بالإضافة الى ذلك فقد اعطت المنظومة طاقة مضاعفة و هو ما يمكن ان يعتبر ميزة مهمة لطريقة الضخ من كلا الطرفين. لكنها لم تحطم الرقم القياسي لكفاءة التجميع الذي تحصلت عليه المجموعة اليابانية Z. Guan و من معه سنة 2018. احد الاسباب التي حالت دون تحطيم هذا الرقم هو ضرورة استعمال مرايا عاكسة لتوجيه ضوء الشمس المركز نحو رأس الليزر و هو احد اهم متطلبات طريقة الضخ المقترحة، في حين ان المجموعة اليابانية استعملت الضخ المباشر بعدسة فرينل. اما المنظومة الثانية باستعمال المرايا المكافئة خارج المحور فقد تجاوزت الرقم القياسي بـ 1.06 مرة المتحصل عليه باستعمال مرآة مكافئة سنة 2018 من طرف Dawei Liang و من معه. و هو ما قد يؤكد تفسيرنا السابق بخصوص استعمال مرايا لتوجيه الضوء نحو رأس الليزر، فالمرآة المكافئة خارج المحور تلعب دورين في نفس الوقت تركيز و توجيه الضوء دون ان يؤثر ذلك على انعكاسيتها. في حين ان Dawei Liang و من معه استعملوا مرآة عاكسة لتوجيه الضوء نحو مركز المرآة المكافئة. يبقى هذا احد الاسباب المؤكدة و قد تكون طريقة الضخ ايضا سببا لهذه الزيادة في طاقة الليزر و كفاءته. حيث جزء الطاقة الذي لم يتم امتصاصه من احد الاطراف يتوجه عبر قضيب الليزر الى طرفه الآخر و هو ما تؤكده عملية المحاكاة.

8.الخلاصة:

اقتصرت منظومات الليزر الشمسي السابقة المحققة عمليا او عن طريق المحاكاة على طريقتين لضخ الوسط الفعال، هما الضخ الجانبي و الضخ الطرفي. على الرغم من أن أنظمة الليزر الأكثر كفاءة لها نهج الضخ الطرفي، الا ان تصاميم الضخ الجانبي مناسبة لتعزز جودة شعاع الليزر إلى حد كبير. في هذا البحث تم اقتراح منظومتي ليزر يتم ضخهما بالشمس تعتمد على طريقة ضخ مختلفة عن ما هو معتاد و التي يمكن وصفها بطريقة الضخ من كلا الطرفين. حيث تم توجيه ضوء الشمس المركز نحو طرفي قضيب الليزر بشكل متناظر.

تتألف المنظومة الاولى لضخ الليزر الشمسي المتناظرة والقابلة للتوسيع من منظومة للتركيز اولية مكونة من عدستي فرينل و مرآتين مستويتين. و رأس ليزر يحتوي على مرآتين من نوع 3D-CPC، و عدستين شبه كرويتين مثقوبتين من السيليكا، وغطاءين مثقوبين من السيليكا، وأخيرا تجويف بصري عبارة عن مرآتين مخروطيتين للضخ الفعال لوسط ليزر من YAG/ ND :YAG/ YAG قطره 9.5mm و طول جزء الـ ND :YAG يساوي 30mm و ، طول كل جزء من YAG يساوي 6mm، اي بطول اجمالي 42mm لمنظومة عدسة فرينل. اما المنظومة الثانية فتم اعتماد مرآتين مكافئتين خارج المحور كمركز اولي و موجه لضوء الشمس نحو رأس ليزر مماثل تماما لرأس الليزر الموصوف في المنظومة الاولى و بأبعاد مختلفة، للضخ الفعال لوسط ليزر من YAG/ YAG /YAG: ND قطره 9.5mm و طول جزء الـ ND :YAG يساوي 34mm و ، طول كل جزء من YAG يساوي 6mm، اي بطول اجمالي 46mm. تم العثور على ظروف ضخ بصرية مثالية من خلال برنامج

ZEMAX©. تم العثور على ثوابت مرنانة الليزر من خلال التحليل العددي لـ LASCAD©. يتم الحصول على طاقة ليزر شمسي متعدد الانماط تبلغ 242.4W و 275.4W على التوالي، مما يؤدي الى كفاءة تجميع تقدر بـ $30.3W/m^2$ و $34.4W/m^2$ للمنظومة الاولى و الثانية على الترتيب.

يوفر نهج الضخ المقترح حلا فعالا للوصول الى طاقة ليزر مضاعفة من جهة، و من جهة اخرى فقد حققت المنظومة الاولى بعدسة فرينل توزيعا لطاقة الضخ على طول الوسط الفعال، و اعطت كفاءة تجميع اكبر بـ 1.01 من تلك التي تحصل عليها T. H. Dinh و من معه سنة 2012 باستخدام عدسة فرينل بنفس الابعاد، كما حققت المنظومة الثانية باستعمال المرايا المكافئة خارج المحور توزيعا لطاقة الضخ على طول الوسط الفعال و بتركيز افضل من عدسة فرينل، و اعطت كفاءة تجميع فاقت القيمة القياسية بـ 1.06المحققة من طرف D. Liang و من معه سنة 2018.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة:

يعد العثور على إمدادات كافية من الطاقة المتجددة للمستقبل أحد التحديات التي يواجهها العلماء. لا شك أن الطاقة الشمسية هي مصدر طاقة متجددة غير محدود، لكنها في الواقع أبعد ما تكون عن الاستغلال الكامل لأن وقت التشغيل محدود بسبب الظروف الجوية وفترة النهار. تشمل جميع أشكال استخدام الطاقة الشمسية الخطوات الوظيفية للجمع والتحويل والتخزين. يعتبر الليزر الذي يتم ضخه بالطاقة الشمسية (Solar pumped laser (SPL أحد أكثر التقنيات الواعدة كمجمع ومحول فعال من حيث التكلفة. SPL هو منظومة مناسبة يمكنها تحويل ضوء الشمس عريض النطاق الترددي إلى ضوء ليزر ضيق النطاق الترددي والمتوازي و النبضي السريع، مع إمكانية الحصول على سطوع وشدة عالية للغاية.

هذا الليزر مرغوب فيه للتطبيقات الفضائية و التي تستمد كل قوتها من الشمس، مثل اتصالات الليزر في الفضاء الحر، ونقل الطاقة من الفضاء إلى الأرض، و كشف وإضاءة وتتبع الأهداف الصعبة في الفضاء. يمكن أن تؤدي أشعة الليزر التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية أيضًا إلى جيل جديد من نظام النقل الخالي من الوقود الموفر للطاقة والفعال من حيث التكلفة مع انبعاثات معدومة من ثاني أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكبريت. عن طريق اختزال المغنيزيوم (Mg) من أكسيد المغنيزيوم (MgO)، تنبعث كميات كبيرة من الحرارة والهيدروجين من تفاعل المغنيزيوم مع الماء. ولكن لكي يعمل محرك احتراق المغنيزيوم كمصدر عملي للطاقة المتجددة، يجب ضخ الليزر بواسطة ضوء الشمسية. تتمتع هذه التكنولوجيا بإمكانيات كبيرة للعديد من التطبيقات الاخرى، على سبيل المثال معالجة المواد ذات درجة الحرارة العالية.

حدثت معظم الجهود المهمة من الناحية التكنولوجية منذ سنة 2007 بعد اعتماد عدسات فرينل كمركزات أولية للطاقة الشمسية. بالمقارنة مع أنظمة المرآة المكافئة ، فإن استخدام عدسات فرينل يقلل من تعقيد ووزن وتكلفة الليزر المضخ بالطاقة الشمسية. الا انه خلال السنوات الاخيرة الماضية تم تحقيق ارقام قياسية في كفاءة التجميع و سطوع الليزر بالرجوع لاستخدام المرايا المكافئة. اقتصرت منظومات الضخ المقترحة سوى منها المحققة عمليا او عن طريق المحاكاة على طريقتين لضخ وسط الليزر هما الضخ الطرفي (من النهاية) و الضخ الجانبي. تعتمد خصائص شعاع الليزر الشمسي بشكل أساسي على طريق ضخ وسط الليزر، على الرغم من أن أنظمة الليزر الأكثر كفاءة لها نهج الضخ الطرفي، إلا أن الضخ الجانبي يعد تركيبا فعالا لتوسيع نطاق الطاقة لأنه يوزع طاقة المضخة الممتصة على طول قضيب الليزر، مما يقلل من مشاكل الحمل الحراري المصاحبة.

من خلال اطروحة الدكتوراه هذا تم اقتراح طريقة ضخ مختلفة تماما على طرق الضخ المعتادة و ذلك من اجل تحسين معلمات حزمة الليزر الشمسي الناتجة، و مقارنتها مع طريقتي الضخ المعتادتين. يتم ضخ قضيب الليزر من كلا الطرفين، تم اقتراح ومحاكاة منظومتي ليز شمسي بواسطة برنامجي التحليل العددي ZEMAX© و الذي يسمح بنمذجة منظومات الليزر الشمسي و تحليلها و LASCAD© الذي يسمح بنمذجة و تحليل مرنانة الليزر. في

المنظومة الاولى تم استخدام عدستي فرينل كمركز اولي بمساحة اجمالية تساوي $8m^2$، المنظومة متناظر تماما بالنسبة للمحور العرضي لقضيب الليزر. يتم توجيه الضوء المركز من عدسة فرينل نحو رأس الليزر بواسطة مرآة تميل بزاوية °45 على المحور الطولي لقضيب الليزر. يتكون رأس الليزر المتناظر من مركزين ثانويين عبارة عن مرآتين من نوع 3D-CPC، و مركز ثالث عبارة عن عدسة شبه كروية رقيقة لزيادة تركيز الاشعاع الشمسي على وسط ليزر قطره 9.5mm و طوله 42mm من YAG/YAG: Nd/ YAG، من اجل زيادة امتصاص وسيط الليزر لطاقة الضخ تم استخدام تجويف بصري عبارة عن مرآتين مخروطيتين، تم اعتماد منظومة تبريد متناظر تسمح بدخول ماء التبريد من وسط القضيب و خروجه من اطرافه، مما يسمح بامتصاص الحرارة بكفاءة من قضيب الليزر. تم تحقيق طاقة ليزر معتبر قدرت بـ 242.4W اي بكفاءة تجميع $30.3W/m^2$ و هي اعلى 1.01 من النتيجة التي تحصل عليها T.H. Dinh و من معه و بطاقة مضاعفة، الذين استخدموا عدسة فرينل بنفس المساحة $4m^2$ باستعمال طريقة الضخ من احد الاطراف.

اما المنظومة الثانية المقترحة فتم استخدام مرآتين مكافئتين خارج المحور كمركز اولي و ذلك من اجل مقارنة كفاءتها مع عدسة فرينل، توجه و تركز المرآتين الضوء نحو رأس ليزر مماثل لرأس الليزر الموصوف في المنظومة الاولى. اعطت هذه المنظومة طاقة ليزر تساوي 275.4W اي بكفاءة $34.4W/m^2$. و هي اعلى بـ 1.06 مرة من الرقم القياسي المحقق عمليا. اثبت هذه الدراسة كفاءة المرايا المكافئة مقارنة بعدسات فرينل في تجميع و تركيز ضوء الشمس.

ان منظومتي الليزر المقترحتين قابلتين للتحقيق العملي و ذلك لأنه تم مراعاة كل المشاكل التقنية التي من شأنها ان تسبب مشاكل عملية عند تحقيق المنظومتين، ومن اهم تلك المشاكل هي استخدام مركزات ثانوية من السيليكا مثل العدسات او الادلة الموجية و التي ستؤدي حتما لامتصاص طاقة الفوتونات في كل عبور. و من اجل تجاوز هذا المشكل تم اعتماد المرايا من نوع 3D-CPC كمركز ثانوي، بالإضافة الى ذلك تم استخدام قطع الـYAG و جعلها ملامسة للهواء من اجل تجنب امتصاص طاقة الفوتونات اثناء تذبذبها من طرف ماء التبريد و مواد المركزات. ادى هذا الحل الى انقاص الطاقة الممتص من طرف وسط الليزر نتيجة للانعكاس الناتج عن الفارق في قرينة انكسار الـ YAG و الهواء، تم إضافة طبقة رقيقة من السيليكا على طرفي قضيب الليزر سمكها 3µm، تعمل كطبقة مضادة للانعكاس للطول الموجي للضخ.

آفاق مستقبلية:

يوفر استخدام تصميم الليزر الشمسي الذي يتم ضخه من الطرفين و القابل للتوسيع، خيارا فعالا لتلبية متطلبات طاقة الليزر متعددة الأوضاع العالية، حيث تسمح منظومة الضخ من كلا الطرفين بمضاعفة طاقة الليزر الشمسي، و هو ما تم تأكيده من خلال المنظومتين المقترحتين، وهو أمر ضروري للعديد من تطبيقات الليزر

الناجحة التي يتم ضخها بالطاقة الشمسية مثل معالجة المواد ذات درجة الحرارة العالية ودورة طاقة المغنيسيوم والهيدروجين.

ان استخدام المرايا المكافئة كمركزات اولية في منظومة الليزر الشمسي المقترحة يعيد الى الواجهة مزايا هذا النوع من المركزات، و الذي يلعب دورين في آن واحدة حيث يوجه و يركز الاشعاع الشمسي، اي ليس هناك حاجة لاستخدام مرايا مستوية لتدوير الاشعاع الشمسي. بالإضافة الى ذلك تمنح امكانية تدوير الاشعاع الشمسي بأي زاوية مرغوبة، و التي يمكن استخدامها في العديد من طرق الضخ في المستقبل والتي من شأنها تحسين كفاءة منظومات الليزر الشمسي و تحسين سطوع حزمة الليزر.

توفر الإثارة المباشرة لأشعة الليزر بواسطة ضوء الشمس إمكانية حدوث انخفاض كبير في تكلفة الإشعاع البصري المتماسك لتطبيقات الطاقة المتوسطة و العالية، تطبيقات مثيرة للاهتمام. علاوة على ذلك يمكن لليزر الشمسي ذو النمط الرئيسي TEM_{00} عالي الطاقة أن يقلل بشكل كبير من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون واستهلاك الطاقة لأنواع الليزر الكهربائية الأخرى التي تعمل بمصادر غير متجددة، مما يؤدي إلى العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية. ان منظومة الليزر الشمسي المضخ من كلا الطرفين قد تؤدي الى تحسن كبير في طاقة و سطوع الليزر الشمسي ذو النمط الرئيسي TEM_{00} وهو ما يجب التفكير فيه بجدية في منظومات الليزر الشمسي المقترحة في المستقبل.

المراجع

المراجع

[1] Einstein, A. (1917) The Quantum Theory of Radiation. Physikalische Zeitschrift 18, 121.

[2] Mario, B. (2005) *The History Of The laser*. IOP Publishing Ltd.

[3] Maiman, T. H. (1961) Stimulated Optical emission in fluorescent solids. Part I. Theoretical consideration, Phys. Rev. 1145-1150.

[4] Koechner, W. Bass, M. (2003) Solid State Lasers. Springer-Verlag Inc., New York,.

[5] Maiman, T. H. (1960) Stimulated optical radiation in ruby. Nature 187, 493.

[6] Kiss, Z. J., Lewis, H. R., Duncan, R. C. (1963) Sun pumped continuous optical maser. Appl. Phys. Lett. 2, 93-94.

[7] Young, C. W. (1966) A sun-pumped cw one-watt laser. Appl. Opt. 5, 993-997.

[8] Schneider, R. T., Kurzweg, U. H., Cox, J. D., Weinstein, N. H. (1983) Research on solar pumped liquid lasers. NASA Technical Reports Server (NTRS).

[9] DeYoung, R. J., Weaver, W. R. (1986) Low-threshold solar-pumped laser using C2F5I. Appl. Phys. Lett. 49, 369-370.

[10] Yesil, O., Christiansen, W. H. (1979) Optically pumped carbon dioxide laser mixtures. J. Energy 3, 315–318.

[11] Lee, J. H., Weaver, W. R. (1981) Solar-pumped gas laser. IEEE J. Quantum Electron. 17, 2438–2440.

[12] Insuik, R. J., Christiansen, W. H. (1984) Blackbody-Pumped CO_2 Laser Experiment. AIAA J. 22, 1271-1274.

[13] DeYoung, R. J. (1986) Low Threshold Solar-Pumped Iodine Laser. IEEE J. Quant. Electron. QE-22, 1019-1023.

[14] Jenkins, D., Lando, M., O'Gallagher, J., Winston, R. (1996) A solar pumped Nd:YAG laser with a record efficiency of 4.7 watt/m^2. Bulletin of Israel Physics Society , 101.

[15] Lando, M., Kagan, J., Linyekin, B., Dobrusin, V. (2003) A solar pumped Nd:yag laser in the high collection efficiency regime. Opt. Commun. 222, 371–381.

[16] Yabe, Y., Ohkubo, T., Uchida, S., Nakatsuka, M., Funatsu, T., Mabuti, A., Oyama, A., Nakagawa, Y., Oishi, T., Daito, K., Behgol, B., Nakayama, Y., Yoshida, M., Motokoshi, S., Sato, Y., Baasandash, C. (2007) High efficiency and economical solar energy pumped laser with Fresnel lens and chromium co-doped laser medium. Appl. Phys. Lett. 90, 261120–261123.

[17] Liang, D., Almeida, J. (2011) Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser. Opt. Express 19, 26399–26405.

[18] Dinh, T. H., Ohkubo, T., Yabe, T., Kuboyama, H. (2012) 120 W continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and a Nd:YAG rod. Opt. Lett. 37, 2670–2672.

[19] Overton, G. (December 2013) NOVEL LASERS: Solar-pumped Nd:YAG Lasers Getting Brighter. In: Laser Focus World. Available at: http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-12/world-news/novel-lasers-solar-pumped-nd-yag-lasers-getting-brighter.html , (February 2021)

[20] Benmair, R. MJ., Kagan, J., Kalisky, Y., Noter, Y., Oron, M., Shimony, Y., Yogev, A. (1990) Solar-pumped Er, Tm Ho: YAG, Laser. Opt. Lett. 15, 36–38.

[21] Weksler, M., Shwartz, J. (1988) Solar-pumped solid-state lasers. IEEE J. Quantum Electron. 24, 1222– 1228.

[22] Arashi, H., Oka, Y., Sasahara, N., Kaimai, A., Ishigame, M. (1984) A solar-pumped cw 18 W Nd:yag laser. Jpn. J. Appl. Phys. 23, 1051–1053.

[23] Almeida, J., Liang, D., Guillot, E. (2012) Improvement in solar pumped Nd:YAG laser beam brightness. Opt. Laser Tech. 44, 2115-2119.

[24] Liang, D., Almeida, J. (2012) Design of ultra-high brightness solar pumped disk laser. Appl. Opt. 51, 6382-6388.

[25] Mizuno, S., Ito, H., Hasegawa, K., Suzuki, T., Ohishi, Y. (2012) Laser emission from a solar-pumped fiber. Opt. Express 20, 5891-5896.

[26] Liang, D., Almeida, J., Guillot, E. (2013) Side-pumped continuous wave Cr:Nd:YAG ceramic solar laser. Appl. Phys. B. - Lasers and Optics 111, 305-311.

[27] Almeida, J., Liang, D., Guillot, E., Abdel-Hadi, Y. (2013) A 40 W cw Nd:yag solar laser pumped through a heliostat: a parabolic mirror system. Laser Phys. 23, 065801-065801.

[28] Liang, D., Almeida, J. (2013) Solar-pumped TEM_{00} mode Nd:YAG laser. Opt. Express 21, 25107–25112.

[29] Almeida, J., Liang, D. (2014) Design of TEM_{00} mode side-pumped Nd:YAG solar laser. Opt. Commun. 333, 219-225.

[30] Liang, D., Almeida, J., Vistas, CR. (2014) Scalable pumping approach for extracting the maximum TEM_{00} solar laser power. Appl. Opt. 53, 7129-7137.

[31] Xu, P., Yang, S., Zhao, C., Guan, Z., Wang, H., Zhang, Y., Zhang, H., He, T. (2014) High-efficiency solar pumped laser with a grooved Nd:YAG rod. Appl. Opt. 53, 3941–3944.

[32] Almeida, J., Liang, D., Vistas, C. R., Guillot, E. (2015) Highly efficient end-side-pumped Nd:YAG solar laser by a heliostat-parabolic mirror system. Appl. Opt. 54, 1970–1977.

[33] Liang, D., Almeida, J., Vistas, C. R., Guillot, E. (2015) Solar-pumped TEM00 mode Nd:YAG laser by a heliostat-parabolic mirror system. Sol. Energy Mat. Sol. Cells 134, 305–308.

[34] Almeida, J., Liang, D., Vistas, C. R., Bouadjemine, R., Guillot, E. (2015) 5.5W continuous-wave TEM00-mode Nd:YAG solar laser by a light guide/2V pump cavity. Appl. Phys. B. - Lasers and Optics 121, 473-482.

[35] Reusswig, P. D., Nechayev, S., Scherer, J. M., Hwang, G. W., Bawendi, M. G., Baldo, M. A., Rotschild, C. (2015) A path to practical Solar Pumped Lasers via Radiative Energy Transfer. Nature Scientific Reports.

[36] Quarterman, A. H., Wilcox, K. G. (2015) Design of a solar-pumped semiconductor laser. Optica 2, 56-61.

[37] Liang, D., Almeida, J., Vistas, C. R., Oliveira, M., Gonçalves, F., Guillot, E. (2016) High-efficiency solar pumped TEM00 mode Nd:YAG laser. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 145, 397–402.

[38] Payziyev, S., Makhmudov, K. (2016) Solar pumped Nd:YAG laser efficiency enhancement using Cr:LiCAF frequency down-shifter. Opt. Commun. 380, 57–60.

[39] Liang, D., Almeida, J., Vistas, C. R. (2016) 25 W/m^2 collection efficiency solar-pumped Nd:YAG laser by a heliostat - parabolic mirror system. Appl. Opt. 55, 7712–7717.

[40] Liang, D., Almeida, J., Vistas, C. R., Guillot, E. (2017) Solar-pumped Nd:YAG laser with 31.5 W/m^2 multimode and 7.9 W/m^2 TEM00-mode collection efficiencies. Sol. Energ. Mat. Sol. Cells 159, 435–439.

[41] Mehellou, S., Liang, D., Almeida, J., Bouajmine, R., Vistas, C. R., Guillot, E., Rehouma, F. (2017) Stable solar-pumped TEM_{00}-mode 1064nm laser emission by a monolithic fused silica twisted light guide. Sol. Energy 155, 1059-107.

[42] Masuda, T., Iyoda, M., Yasumatsu, Y., Endo, M. (2017) Low-concentrated solar-pumped laser via transverse-excitation fiber-laser geometry. Opt. Lett. 42, 3427-3430.

[43] Saiki, T., Fujiwara, N., Matsuoka, N., Nakatuka, M., Fujioka, K., Iida, Y. (2017) Amplification properties of KW Nd/Cr:YAG ceramic multi-stage active-mirror laser using white-light pump source at high temperatures. Opt. Commun. 387, 316–321.

[44] Liang, D. Almeida, J. Vistas, C.R. Guillot, E. (2017) High efficiency solar pumped Nd:YAG with 31.5 W/m^2 multimode and 7.9 W/m^2 TEM_{00} mode collection efficiencies, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 159 435–439.

[45] Guan, Z. Zhao, C. Li, J. He, D. and Zhang, H. (2018) 32.1 W/m^2 c. w. solar-pumped laser with a bonding Nd: YAG/YAG rod and a Fresnel lens. Opt. Laser Technol. 107, 158–161.

[46] Liang, D. Cláudia, R. Vistas, Tibúrcio, B.D., Almeida, J. (2018) Solar-pumped Cr:Nd:YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 185, 75–79.

[47] Matos, R., Liang, D., Almeida, J., Tibúrcio, B.D., Cláudia, R. Vistas, (2018) High-efficiency solar laser pumping by a modified ring-array concentrator. Optics Communications 420 6–13.

[48] Lando, M., Shimony, Y., Benmair, R. MJ., Abramovich, D., Krupkin, V., Yogev, A. (1999) Visible solarpumped lasers. Opt. Mater. 13, 111–115.

[49] Tibúrcio, B.D., Liang, D., Almeida, J., Dário Garcia, Cláudia R. Vistas, (2019) Dual-rod pumping approach for tracking error compensation in solar-pumped lasers, J. Photon. Energy 9(2), 028001.

[50] Almeida J., Liang D., Vistas, C.R. (2018) A doughnut-shaped Nd:YAG solar laser beam, Optics and Laser Technology 106 (2018) 1–6.

[51] Vistas C. R., Liang D., Almeida J., Tibúrcio B. D., Garcia D., Catela M., Costa H., Guillot E. (2021) Ce:Nd:YAG side-pumped solar laser. J. of Photonics for Energy, 11(1), 018001.

[52] Young M. (2000) *Optics and Lasers*. Springer.

[53] Serwy – jewett (2004), *Physics For Scientists And Engineers*. Thomson Books.

[54] بيلا آ لينكيل، ترجمة فاروق عبودي قصير(1984)، *الليزرات*، جامعة الموصل، العراق.

[55] William T. Silfvast (2004), *LASER FUNDAMENTALS*, Cambridge University Press.

[56] محمد الكوسا (2005)، فيزياء الليزر وتطبيقاته، جامعة دمشق، سوريا.

[57] Lasers and non-linear optics Laser : Fundamentals http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C01/co/Grain_OPI_ang_M01_C01_5.html, (January 2021)

[58] Breck Hitz C., Ewing J. J., Hecht J. (2004) Introduction to laser technology. Wiley-IEEE Press, New YorK.

[59] د. عمر خليل احمد الجبوري، احمد حسن احمد الجبوري (2010)، مبادئ الطاقات المتجددة، المعهد التقني – الحويجة كركوك، العراق.

[60] C. Julian Chen، ترجمة مصطفى محمد فؤاد (2010)، فيزياء الطاقة الشمسية، مؤسسة هنداوي، المملكة المتحدة.

[61] Tabak J. (2009) Solar and Geothermal Energy. Facts On File, Inc., New YorK.

[62] A.Duffie J., Beckman W. A. (1991) Solar Engineering of Thermal Process. Chapter 1, edited by John Wiley & Sons, Inc..

[63] Sukhatme S. P. (1982) Solar Energy, Principles of Thermal Collection and Storage. Chapter 6, edited by McGraw-Hill.

[64] Kreider J. F., Kreith F. (1981) Solar Energy Handbook. Chapter 8, edited by McGraw- Hill.

[65] Winston R., Welford T. W. (1980) Design of Nonimaging Concentrators as a Second Stage in Tandem with Image-Forming First-Stage Concentrators. Applied Optics, Vol. 19,No. 3, pp. 347- 351,.

[66] Rabl A., (1976) Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators. Solar Energy, Vol. 18, pp. 497-511.

[67] Lof G. O. G., Fester D. A., Duffie J. A. (1962) Energy Balance on A Parabolic Cylinder Solar Reflector. Journal of Engineering for Power, Vol. 84A, pp.24.

[68] Lof G. O. G. and Duffie J. A. (1963) Optimization of Focusing Solar-Collectors Design, Trans. SME, Journal of Engineering for Power, Vol. 85A, pp. 221,.

[69] Winston R., Cooke D., Gleckman P. and O'Gallagher J. J. (1992)Ultra-High Solar Flux and Applications to Laser Pumping, Proc. Of Proc. of Renewable Technology and the Environment, the Second World Renewable Energy Congress, Vol. 1, Edited by A. A. M. Sayigh, Pergamon Press, Reading, U.K..

[70] Rabl A. (1985), Active Solar Collectors and Their Applications, OXFORD UNIVERSITY PRESS, New York.

[71] Karathanasis S. (2019) Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration, Springer Nature Switzerland, Cham, Switzerlandk.

[72] http://www.terrypepper.com/lights/closeups/illumination/fresnel/fresnel.htm, (January 2021).

[73] Leutz R., Suzuki A. (2001) Nonimaging Fresnel Lenses Design and Performance of Solar Concentrators, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[74] Welford W.T. (1989) High Collection Nonimaging Optics, Academic Press.

[75] Winston R. (1974) Principles of Solar Concentrators of A Novel Design, Solar Energy, Vol. 16, pp. 89-95.

[76] Phillipps G., Nd-Laser, Report of the Institute of Optics, technical University of Berlin, Berlin, Germany, (December 1993).

[77] O'Gallagher J. J. and Winston R. (1983) Development of Compound Parabolic Concentrators for Solar Energy, International Journal of Ambient Energy, Vol. 4, No. 4, pp. 171-186,.

[78] (March 2013) Space Solar Power: Limitless clean energy from space. In: National Space Society. Available at: https://space.nss.org/space-solar-power-info/, (February 2021).

[79] (October 2014) Towards Megawatt Solar Powered Lasers for Magnesium Production and future space applications. In: Nextbigfuture. Available at: https://www.nextbigfuture.com/2014/10/solar-powered-lasers-for-magnesium.html, (February 2021).

[80] Galle, P. (2008) Estimating Laser Diode Lifetimes and Activation Energy., ILX Lightwave Corporation.

[81] Lando, M., Kagan, J., Shimony, Y., Kalishy, Y., Noter, Y., Yogev, A., Rotman, S., Rosenwaks, S. (1997) Solar-pumped solid state laser program. Proc. SPIE 3110, 196-201.

[82] Massimiliano, V., Maddock, C. A. (2012) Pure design of a formation of solar pumped lasers for asteroid deflection. Adv. Space Res. 50, 891 – 905.

[83] Liang, D., Almeida, J., Oliveira, M., Gonçalves, F., Vistas, C. R. (April 2015) Advances in high-efficiency TEM00-mode solar-pumped laser. 1st Workshop on Laser solutions for Orbital Space Debris - Paris - France.

[84] Almeida, J., Liang, D., Oliveira, M., Gonçalves, F., Vistas, C. R. (April 2015) Progress in solar-pumped laser efficiency by heliostat parabolic mirror system. 1st Workshop on Laser solutions for Orbital Space Debris - Paris - France.

[85] Yabe, T., Ohkubo, T., Dinh, T., Kuboyama, H., Nakano, J., Okamoto, K. (2012) Demonstration of solarpumped laser-induced magnesium production from magnesium. Wiley 55 – 58.

[86] Yabe, T., Uchida, S., Ikuta, K., Yoshida, K., Baasandash, C., Mohamed, M. S., Sakurai, Y., Ogata, Y., Tuji, M., Mori, Y., Satoh, Y., Ohkubo, T., Murahara, M., Ikesue, A., Nakatsuka, M., Saiki, T., Motokoshi, S.,Yamanaka, C. (2006) Demonstrated fossil-fuel-free energy cycle using magnesium and laser. Appl. Phys. Lett. 89, 261107.

[87] Guan, Z., Zhao, C., Yang, S., Wang, Y., Ke, J., Gao, F., Zhang, H. (2016) Low-threshold and high-efficiency solar-pumped laser with Fresnel lens and a grooved Nd:YAG rod. Proc. of SPIE 10016 , 1001609-9.

[88] Smyth C. J. C., mirkhanov S., quarterman A. H., and wilcox K. G. (2018) 27.5 W/m^2 collection efficiency solar laser using a diffuse scattering cooling liquid. Applied Optics Vol. 57, No.15, 4008–4012

[89] Jagoo Z. (2013)Tracking Solar Concentrators - A Low Budget Solution. Springer Netherlands.

[90] Insuik, R. J., Christiansen, W. H. (1984) Blackbody-Pumped CO2 Laser Experiment. AIAA J. 22, 1271-1274.

[91] Frankl J. (1962) Sun-powered lasers. Inst. 274, 531–532.

[92] DeYoung, R. J. (1986) Low Threshold Solar-Pumped Iodine Laser. IEEE J. Quant. Electron. QE-22, 1019-1023.

[93] Endo, M. (2007) Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers. Opt. Express 15, 5482-5493.

[94] Yabe T., Bagheri B., Ohkubo T., Uchida S., Yoshida K., Funatsu T., Oishi T., Daito K., Ishioka M., Yasunaga N., Sato Y., Baasandash C., Okamoto Y., and Yanagitani K. (2008) 100 W-class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle. Applied Physics 104, 083104.

[95] Catela M., Liang D., Almeida J., and R. Vistas C. (2019) Homogenization and penetration effects of 1064 nm Nd:YAG solar laser and concentrated solar radiations on ex vivo chicken breast samples. J. Laser Appl. 31, 022010.

[96] Mehellou S., Rehouma F., Hamrouni N., and Bouras L. (2018) Thermal loading effects on Nd:YAG solar-laser performance in end-pumping and side-pumping configurations: a review. Optical Engineering 57(12), 120902.

[97] //, The FEA Code of LASCAD. LAS-CAD GmbH, Brunhildenstrasse 9 D-80639 Munich, Germany.

[98] //, Computation of Laser Power Output for CW Operation. LAS-CAD GmbH, Brunhildenstrasse9 D-80639 Munich, Germany.

[99] LASCAD - The Laser Engineering Tool. LAS-CAD GmbH.

[100] Fox, A. G., Li, T. (1960) Resonant modes in a maser interferometer. Bell.Sys.Tech. 40, 453-488.

[101] ASTM Standard G173 - 03 (2012), “Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface” (2012).

[102] Zhao B., Zhao C., He J., Yang S. (2007)The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers. Acta Opt. Sin. 27, 1797–1801.

[103] Liang, D., Almeida, J., Vistas, CR. (2014) Scalable pumping approach for extracting the maximum TEM00 solar laser power. Appl. Opt. 53, 7129-7137.

[104] Clarkson, W. A. (2001) Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers. J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 2381-2395.

[105] Weber, R., Neuenschwander, B., Mac Donald, M., Roos, M. B., Weber, H. P. (1998) Cooling schemes for longitudinally diode laser-pumped Nd:YAG rods. IEEE J. Quantum Electron. 34, 1046-1053.

Journal of Fundamental and Applied Sciences

ISSN 1112-9867

Available online at http://www.jfas.info

Special Issue

In celebrating the 10th anniversary of JFAS

STUDY OF Nd: YAG SOLAR LASER OUTPUT PERFORMANCE IN END PUMPING AND SIDE PUMPING CONFIGURATIONS

N. Hamrouni, S. Mehellou*, F. Rehouma

LEVRES laboratory, University of El Oued 39000 Algeria

Received: 01 October 2019/ Accepted: 08 December 2019 / Published online: 01 January 2020

ABSTRACT

Since the report of the first sun-pumped solid-state laser, several pumping schemes have been proposed for enhancing the solar-laser performance.

Although the most efficient laser systems have end-pumping approaches, side-pumping configurations are very suitable for reducing the thermal loading problems and consequently producing higher laser beam quality. Here we report a study of the Nd: YAG solar-lasers performance by using either end-pumping or side-pumping techniques.

The end-pumping configuration provides simultaneously, in multimode regime, the maximum laser power (120 W continuous wave), the highest collection efficiency (32.1 W/m^2), the highest slope efficiency (8.9 %), the lowest threshold pump power (192 W) and in monomode operation the highest fundamental-mode collection efficiency (7.9 W/m^2) the highest solar laser brightness (6.5 W). However, the side-pumping approach is very preferred for achieving high laser beam quality in monomode operation ($M^2 < 1.05$).

Keywords: Solar irradiance; parabolic mirror; Fresnel lenses; solar-pumped laser; end-pumping configuration; side-pumping method; solar-laser power.

Author Correspondence, e-mail: saidmeh@gmail.com

doi: http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v12i1S.4

Journal of Fundamental and Applied Sciences is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. Libraries Resource Directory. We are listed under Research Associations category.

1. INTRODUCTION

As the natural sunlight does not provide power density sufficient enough for lasing, additional focusing systems are usually required to convert solar power into laser radiation. Since the report of the first solar-pumped solid-state laser [1], researchers have been exploiting parabolic mirrors, Fresnel lenses, heliostats to attain enough solar flux at the focal point. The utilization of the compound parabolic concentrators (CPC) as secondary pumping cavities further boosted up the solar laser power level [2, 3]. To increase the spectral match between the emission spectrum of the pump radiation and the absorption spectrum of the laser medium, crystals of different active materials were tested [4]. Several pumping architectures have been proposed for solar-pumped lasers [5]. Although the most efficient laser systems have end-pumping approach, side-pumping is an effective configuration for producing high laser beam-quality as it allows uniform absorption distribution along the laser rod axis and spreads the absorbed power within the laser medium, reducing the associated thermal loading problems [6].

Renewable lasers have a large potential for many applications. Some of these applications require operation of the laser system with end-pumping method since it produces the highest performances, as well as other applications can be feasible with side-pumping configuration because it leads to obtain a high laser beam-quality [7]. Therefore, it is highly desirable to study the performance of the solar-laser systems with end-pumping and side-pumping configurations.

Aiming to show the pumping configurations performances, we report here a study of research carried out on Nd: YAG solar-laser systems by using either end-pumping or side-pumping techniques.

A brief description of the solar-laser systems with end-pumping and side-pumping configurations will be firstly introduced in Section 2. A citation of the record results of the laser-systems with end-pumping configuration, along with the most important results on continuous wave solar laser oscillation systems using side-pumping method will be given in Section 2-1 and Section 2-2, respectively, followed by discussions in Section 3 and conclusions in Section 4.

2. PERFORMANCE STYDY OF THE SOLAR LASER SYSTEMS

The collection efficiency is generally regarded as a primary figure of merit for solar-lasers. The second is thermal problem worsening the efficiency as well as the beam quality [8]. The research that have been marked by record results in solar-laser field are summarized below in order to show, first that the end-pumping solar-laser systems are the most efficient; however, the thermal load effects caused by non-uniform distribution of pump light, typical in these pumping configurations, lead to a poor solar-laser beam quality [9]. Second, that the side-pumping systems are the most effective for producing high solar-laser beam quality and stability as they give uniform absorption within the laser medium, reducing the associated thermal loading problems [9].

2.1 Research carried out on solar laser systems using end pumping method and characterized by record-high results

For clearly exhibiting the results of research carried out on solar-laser systems using end-pumping method, performance details of these systems will be given afterward. Divers literatures were made for the solar-laser performance improvement. Research details will be given for both multimode and monomode solar-laser operations, respectively.

In multimode regime, by using the end-pumping method, the maximum laser power of 120 W continuous wave [10], the highest collection efficiency of 32.1 W/m^2 [11], the highest slope efficiency of 8.9 % [12] and the lowest threshold pump power of 192 W [13] were attained. In monomode operation the highest fundamental-mode collection efficiency of 7.9 W/m^2 [12] and the highest solar laser brightness of 6.5 W were achieved [14].

2.2 Research carried out on solar laser systems with side pumping configuration and marked by record-high results

The researches carried out on solar-laser systems with side-pumping configuration show that these systems provide simultaneously, in monomode operation, high solar-laser beam quality and stability.

The beam quality factors (M^2_x and M^2_y), which are defined by the ratio between laser beam divergence and divergence of diffraction-limited Gaussian beam, characterize the solar-laser beam quality.

M^2_x and M^2_y less than 1.05 are reached by using the side-pumping method. More importantly, a fundamental mode solar-laser with 1.7% laser power stability is produced, being significantly more stable than the previous monomode solar lasers [8].

3. DISCUSSIONS

Since the first report of "A sun-pumped c w one-watt laser" in 1966 [01], several pumping architectures have been proposed for solar-pumped laser ystems to improve their performance [08]. These laser systems can have either side-pumping or end-pumping configurations.

The most efficient laser systems have end-pumping approaches because of the high absorption efficiency of the pump-light by the laser crystal. In turn the thermal loading effects caused by nonuniform distribution of pump-light in these pumping configurations affect negatively the laser beam quality [9].

In multimode regime, by using the end-pumping method, high collection efficiency of 32.1 W/m^2 was attained by pumping a large Nd: YAG rod through a large Fresnel lens. However, very large $M^2_x = M^2_y = 61$ factors have been associated with this approach, resulting in very poor beam quality [11].

For the fundamental-mode operation, record-high collection efficiency of 7.9 W/m^2 with only 1.2 as M^2 factors was reported [12].

Side-pumping is an effective configuration for producing high laser beam-quality and stability as it allows uniform absorption distribution along the laser rod axis and spreads the absorbed power within the laser medium, reducing the associated thermal loading problems of the end-pumping method [9].

In contrast to the end-pumping configuration, the side-pumping method leads to low collection efficiency but also to very low M^2 factors. Record-low M^2 factors less than 1.05 have been achieved [8].

4. CONCLUSION

To improve solar-laser performance, several pumping architectures have been proposed. These pumping architectures can be either side-pumping or end-pumping configurations.

The most efficient laser systems have end-pumping configurations because of the high absorption efficiency of the pump-light by the laser crystal, the thermal loading effects caused by nonuniform distribution of absorbed pump-light typical in these pumping configurations affect negatively their laser beams quality.

In multimode regime, the maximum laser power (120 W continuous wave), the highest collection efficiency (32.1 W/m^2), the highest slope efficiency (8.9 %), the lowest threshold pump power (192 W) were achieved. In monomode operation, despite the highest solar laser brightness (6.5 W) obtained, the M^2 beam quality factors less than 1.2 could not be obtained because of the negative thermal loading effects characterizing these pumping methods.

As mentioned above, the most efficient laser systems have end-pumping configurations; the side-pumping approach is very preferred for achieving high laser beam quality in monomode operation, $M^2 < 1.05$ was obtained. In addition to the high solar-laser beam quality, the side-pumping configuration presents the advantage to be able to produce a stable fundamental-mode solar-laser power. Maximum output power variation being <1.7% was obtained. The Gaussian fundamental-mode profile was also found stable during the process.

6. REFERENCES

[1] Young C. G., A sun-pumped c. w. one-watt. Laser Appl. Opt., 1966, 5(6), 993 – 995.

[2] Weksler M. and Shwartz J., Solar-pumped solid-state lasers, IEEE J. Quantum Electron., 1988, 24 (6), 1222 –1228.

[3] Cooke D., Sun-pumped lasers: revisiting an old problem with nonimaging optics, Appl. Opt., 1992, 36, 7541–7546,
doi: 10.1364/AO.31.007541.

[4] Benmair R. M. J., Kagan J., Kalisky Y., Noter Y., M. Oron M., Shimony Y., and A. Yogev A., Solar-pumped Er, Tm, Ho: YAG laser, Opt. Lett., 1990, 15 (1), 36 – 33,
doi: 10.1364/OL.15.000036.

[5] Geraldes J. P. and Liang D., An alternative solar pumping approach by a light guide assembly elliptical-cylindrical cavity, Solar Energy Mater, Solar Cells, 2008, 92 (8), 836 – 843,
doi:10.1016/j.solmat.2008.01.019

[6] Lando M. et al., A solar-pumped Nd: YAG laser in the high collection efficiency regime, Opt. Commun., 2003, 222 (1–6), 371 – 381,
doi: 10.1016/S0030-4018(03)01601-8.

[7] Liang D. and Almeida J., Solar-pumped TEM_{00}-mode Nd: YAG laser, Opt. Express, 2013, 21 (21), 25107,
doi: 10.1364/OE.21.025107.

[8] Mehellou S. et al., Stable solar-pumped TEM00-mode 1064 nm laser emission by a monolithic fused silica twisted light guide, Solar Energy, 2017, 155, 1059 –1071,
doi: 10.1016/j.solener.2017.07.048

[9] Mehellou S., Rehouma F., Hamrouni N., Bouras L., Thermal loading effects on Nd:YAG solar-laser performance in end-pumping and side-pumping configurations: a review, Opt. Eng., 2018, 57(12), 120902,
doi: 10.1117/1.OE.57.12.120902.

[10] Dinh, T.H., Ohkubo, T., Yabe, T., Kuboyama, H., 120 watt continuous-wave solar pumped laser with a liquid light-guide lens and a Nd:YAG rod, Opt. Lett., 2012, 37, 2670–2672,
doi: 10.1364/OL.37.002670.

[11] Z. Guan Z., et al., 32.1 W/m^2 c. w. solar-pumped laser with a bonding Nd: YAG / YAG rod and a Fresnel lens, Opt. Laser Technol., 2018, 107, 158–161.
doi: 10.1016/j.optlastec.2018.05.039.

[12] Liang D., Almeida J., Vistas C. R., Guillot E., Solar-pumped Nd: YAG laser with 31.5 W/m^2 multimode and 7.9 W/m^2 TEM_{00}-mode collection efficiencies, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 159, 435–439,
doi: 10.1016/j.solmat.2016.09.048.

[13] Almeida J., Liang D., Guillot E., Abdel-Hadi Y., A 40 W c. w. Nd: YAG solar laser pumped through a heliostat: a parabolic mirror system., Laser Phys., 2013, 23(6): 065801-6,
doi: 10.1088/1054-660X/23/6/065801.

[14] Liang D., Almeida J., and Vistas C. R., 25 W/m^2 collection efficiency solar-pumped Nd: YAG laser by a heliostat–parabolic mirror system, Appl. Opt., 2016, 55(27), 7712–7716,
doi: 10.1364/AO.55.007712.

How to cite this article:
Hamrouni N., Mehellou S. and Rehouma F. Study of Nd: YAG solar-laser out put performance in end-pumping and side-pumping configurations. J. Fundam. Appl. Sci., 2020, *12(1S), 49-55.*