



2.2 الياقوت Ruby

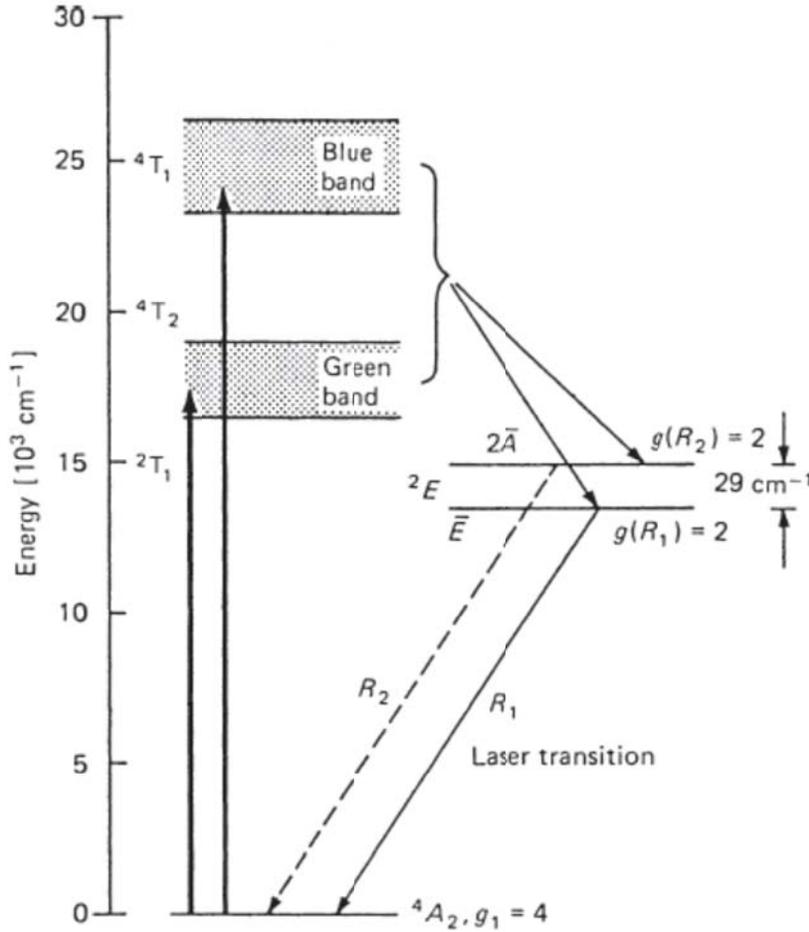
ليزر الروبي $Cr^{3+}:Al_2O_3$ هو ليزر ذو المستويات الثلاثة. والذي يتطلب ضخ بلورة الليزر بطاقة عالية للوصول إلى انقلاب التعداد اللازم لعمل الليزر. طاقة الضخ العالية هذه تجعل من كفاءة نظام ليزر المستويات الثلاثة الاجمالية تكون منخفضة، وهذا يجعل من استخدام هذه الانظمة في الليزر في يومنا هذا محدودا. تحتوي بلورة الروبي كيميائيا على الياقوت (Al_2O_3) مع استبدال كمية صغيرة من Al^{3+} بـ Cr^{3+} . وذلك من خلال اضافة Cr_2O_3 إلى Al_2O_3 المذاب والنقي جدا. يمتلك الياقوت افضل الخواص الميكانيكية حرارية بين كل مواد ليزرات الحالة الصلبة. البلورة صلبة جدا، وتمتلك موصلية حرارية عالية، وتنمو البلورة بجودة عالية جدا بطريقة Czochralski. ايون Cr^{3+} يمتلك ثلاثة إلكترونات مستوى d في الحزمة الغير ممتلئة، المستوى الارضي للأيون الحر يوصف بالرمز الطيفي 4A . نسبة التطعيم تكون 0.05wt% من Cr_2O_3 .

مخطط مبسط لمستويات طاقة الروبي موضح في الشكل 1.2. في ليزرات الروبي، يكون انقلاب التعداد بالنسبة للمستوى 2E يحدث بالضخ الضوئي لايونات Cr^{3+} من المستوى الارضي 4A_2 إلى الحزمة العريضة من مستويات الطاقة 4T_2 و 4T_1 . ومتوسط العمر لمستويات الضخ، ذات الاتساع 1000nm تقريبا عند اللون الاخضر ($18,000cm^{-1}$) واللون البنفسجي ($25,000cm^{-1}$)، تكون قصيرة جداً، وتعود الايونات إلى مستوى 2E الـ metastable والذي عمره يبلغ 3ms. ينفصل المستوى الـ metastable إلى مستويين فرعيين فرق الطاقة بينهما هو $\Delta E=29cm^{-1}$. المستوى العلوي $2A$ والمستوى الادنى E . والانتقالين ($2A \rightarrow ^4A_2$ و $E \rightarrow ^4A_2$) يشار لهما بالانتقالين R_1 و R_2 ، والذين يقعان بالقرب من المنطقة المرئية عند الطول الموجي 594.3nm و الطول الموجي 692.9nm، على التوالي. اتساع هذه الخطوط هو $\Delta\nu=330GHz$ عند درجة حرارة الغرفة وهما ذو اتساع متجانس بسبب التفاعل بين ايونات Cr^{3+}



اهتزازات الشبكة البلورية. الخطين R متصلين مع بعضهما البعض بواسطة الاضمحلال السريع جدا والغير مشع، يحدث اتزان حراري ويكون تعداد المستوى الادنى E مرتفع جداً.

عند الاتزان الحراري يكون الفرق في التعداد بين المستويين E و 2A محدد بمعامل بولتزمان $\kappa = \exp(\Delta E/kT)$. عند درجة حرارة الغرفة يكون معامل بولتزمان $\kappa = 0.87$.



الشكل 1.2: مستويات الطاقة الهامة في Cr^{3+} في الروبي (الفاصل في 2E لا يخضع لمقاييس رسم)

الانتقال R_1 يصل للحالة الحرجة قبل الانتقال R_2 لان له انقلاب تعداد اعلى. وبمجرد بدأ عمل الليزر في R_1 ، يصبح المستوى E مستنزف وينتقل التعداد من المستوى المجاور 2A وبسرعة كبيرة مما يتسبب في استحالة الوصول إلى الحالة الحرجة للانتقال R_2 . ولهذا، فان تعداد المستويين يضمحل من خلال الانبعاث R_1 . اذا



قارنا مخطط مستويات الطاقة للروبي مع مخطط مستويات الطاقة لنظام الليزر ثلاثي المستويات في الشكل 6.1، فان المستويات $4T_1$ و $4T_2$ مع بعضهما يشكلان المستوى 3، في حين المستويات $4A_2$ و $2E$ يمثلان المستوى 2 و 1 على التوالي. ويمكن ان نكتب

$$n_2 = n_2(R_1) + n_2(R_2) \quad (2.1)$$

لمستوى الطاقة الـ metastable و n_1 للمستوى الارضي. الحالة الحرجة والحصيلة في الروبي تعتمد فقط على تعداد المستوى $n_2(R_1)$. ويربط الحصيلة والحالة الحرجة مع تعداد المستوى الارضي n_1 أو العدد الكلي لأيونات Cr^{3+} n_{tot} ، فانه يجب ان نأخذ التعداد $n_2(R_2)$ في الحسبان. في الروبي فان كل المستويات تتحلل، وهذا يعني ان

$$g(n_1) = 4, \quad g(R_1) = g(R_2) = 2. \quad (2.2)$$

بسبب تحلل الطاقة degeneracy الكبير للمستوى الارضي، يحدث التكبير عندما يكون المستوى R_1 على الاقل نصف كثافة تعداد المستوى الارضي. لان،

$$n_2(R_1) + n_2(R_2) + n_1 = n_{tot}, \quad (2.3)$$

يكون لدينا التعداد عند الحالة الحرجة (300 K)

$$\begin{aligned} n_2(R_1) &= \frac{n_{tot}}{3 + \kappa} = 0.26n_{tot}, \\ n_2(R_2) &= \frac{\kappa n_{tot}}{3 + \kappa} = 0.22n_{tot}, \\ n_1 &= \frac{2n_{tot}}{3 + \kappa} = 0.52n_{tot}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

ولهذا يجب ان يكون عدد الذرات اقل بقليل جدا من نصف الذرات في مستويات الطاقة العلوية حتى نصل إلى الحالة الحرجة. وبتركيز Cr^{3+} يصل إلى $1.58 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ وطاقة فوتون $h\nu = 2.86 \times 10^{-19} \text{ Ws}$ ، نحصل على كثافة طاقة المطلوبة عند مستوى الـ metastable للحصول على النفاذية في الروبي طبقا للمعادلة (2.4)،

$$J_{th} = \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa + 3} \right) n_{tot} h\nu = 2.18 \text{ J/cm}^3. \quad (2.5)$$



ومعامل الحصييلة عند الاشارة الصغيرة small-signal gain coefficient في الروبي يكون

$$g_0 = \sigma \left[n_2(R_1) - \frac{g(R_1)n_1}{g(n_1)} \right], \quad (2.6)$$

حيث σ هي مساحة مقطع الانبعاث الاستحثائي stimulated emission cross section للانتقال R_1 و $n_2(R_1)$ هي كثافة التعداد للمستوى E.

حيث ان $\sigma = \sigma_{12}g(n_1)/g(R_1)$ ، فان معامل الحصييلة يمكن ان يعبر عنه على النحو التالي (بافتراض ان $\kappa=1$)

$$g_0 = \alpha_0 \left(\frac{2n_2}{n_{tot}} - 1 \right), \quad (2.7)$$

حيث $\alpha_0 = \sigma_{12}n_{tot}$ هي معامل الامتصاص للروبي. ومساحة مقطع الامتصاص للروبي هي $\sigma^{12} = 1.22 \times 10^{-10} \text{ cm}^2$ ومعامل الامتصاص هو $\alpha_0 = 0.2 \text{ cm}^{-1}$.

مع كل ايونات الكروميوم في مستوى الطاقة الارضي ($n_2=0$)، فان الحصييلة لبلورة الروبي التي لم تضخ هي $g_0 = -\alpha_0$ (باستخدام التقريب $\kappa=1$).

مثال ليزر الروبي يشرح بوضوح العقبات التي تواجه نظام الليزر ثلاثي المستويات.

(a) بالمقارنة بين نظام الليزر ذو المستويات الاربعة ونظام الليزر بنظام ثلاثي المستويات مثل ليزر الروبي و Er:glass، والانظمة الليزر الشبيه بالثلاثي المستويات مثل Yb:YAG يتطلب طاقة ضخ عالية لان جزء كبير من الطاقة يكون مطلوباً للنفاد داخل المادة.

(b) لان المستويات الثلاثة وليزرات شبيه المستويات الثلاثة تمتص الطول الموجي لليزر ما لم يحقق الضخ حالة انقلاب التعداد، أي جزء من بلورة الليزر التي تعزل عن الضخ الضوئي، مثل حامل قضيب الليزر سوف يشكل خسارة كبيرة نتيجة للامتصاص.

بالرغم من هذه العقبات الواضحة، ليزرات المستويات الثلاثة لها ميزات مفيدة، مثل الطول الموجي المطلوب أو طريقة ضخ ذات كفاءة عالية، تجعل من هذه الليزرات جذابة. على سبيل المثال ليزر الروبي



يشع في منطقة الطيف المرئي، وله نطاق امتصاص واسع ومناسب لضوء الفلاش، وله فلوريسنت ذو عمر كبير نسبياً ومساحة مقطع انبعاث استثنائي كبير.

2.3.2 ليزر Nd:Glass

هناك العديد من الخصائص التي تجعل الزجاج مميزاً من ضمن ليزرات الحالة الصلبة. فهي ذات خواص متماثلة في كافة الاتجاهات. ويمكن ان تطعم بتراكيز عالية بدرجة عالية من التماثل، ويمكن ان تصنع بقطع كبيرة وبجودة بصرية تصل إلى حد الـ diffraction-limit. بالإضافة إلى ان ليزرات الزجاج صنعت بأشكال واحجام متنوعة، من الياف دقيقة يصل قطرها إلى بضعة ميكرومترات إلى اطوال تصل إلى 2 متر وبقطر يصل إلى 7.5 سنتيمتر واقراص يصل قطرها إلى 90 سنتيمتر وبسمك 5 سنتيمتر.

من اشهر الانواع التجارية هو اكسيد الزجاج، بالدرجة الأولى السليكا والفوسفات، أي SiO_2 و P_2O_5 . الجدول 5.2 يلخص بعض الخواص الفيزيائية العامة والخواص الضوئية لزجاج السليكا والفوسفات المتوفرة تجارياً.

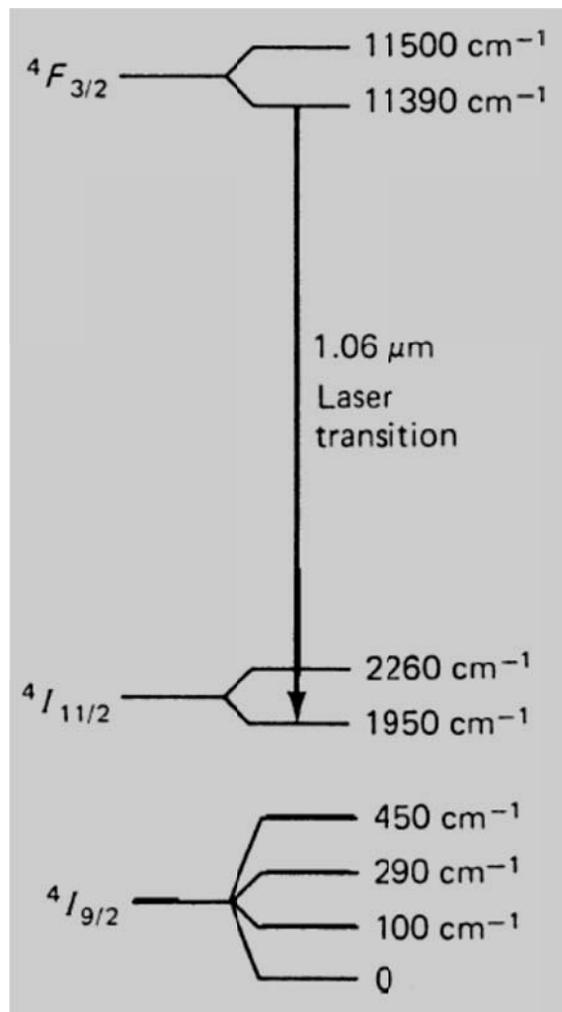
زجاج الفوسفات يمتلك مساحة مقطع انبعاث كبير ومعامل غير خطي صغير بالمقارنة مع زجاج السليكا. وهاتين الخاصيتين تجعل التطعيم بـ Nd في زجاج الفوسفات افضل اختيار لأنظمة الليزر الكبيرة المستخدمة في ابحاث الاندماج [57-2.53].

هناك اختلافين هامين بين ليزرات البلورات وليزرات الزجاج، الاختلاف الأول، هو الموصلية الحرارية للزجاج اقل بكثير من تلك في البلورات. والاختلاف الثاني هو ان خطوط الانبعاث للأيونات في الزجاج اكثر اتساعاً من البلورات. الخط المتسع يزيد من الحالة الحرجة لليزر. وبالرغم من ذلك، هذا الاتساع له ميزة. فالخطوط الطيفية المتسعة توفر امكانية تكبير النبضات الضوئية القصيرة، بالإضافة إلى انها تسمح بتخزين كمية كبيرة من الطاقة في الوسط المكبر لنفس معامل التكبير الخطي. ولهذا فان ليزرات الزجاج والبلورات يكملان بعضهما البعض. ولتشغيل الليزر بشكل مستمر أو بنبضات ذات تردد عالي فان المواد البلورية توفر حصيلة عالية وموصلية حرارية افضل. الزجاج افضل لتشغيل الليزر بنمط النبضات ذات الطاقة العالية لأنه يكون بحجم اكبر، واكثر مرونة في خواصه الفيزيائية والبصرية، وخط فلوريسنت لها اكثر اتساعاً.



الجدول 5.2. الخواص الفيزيائية والبصرية للزجاج المطعم بالـ Nd

Spectroscopic properties	Glass type					
	Q-246 Silicate (Kigre)	Q-88 Phosphate (Kigre)	LHG-5 Phosphate (Hoya)	LHG-8 Phosphate (Hoya)	LG-670 Silicate (Schott)	LG-760 Phosphate (Schott)
Peak wavelength (nm)	1062	1054	1054	1054	1061	1054
Cross section ($\times 10^{-20}$ cm^2)	2.9	4.0	4.1	4.2	2.7	4.3
Fluorescence lifetime (μs)	340	330	290	315	330	330
Linewidth FWHM (nm)	27.7	21.9	18.6	20.1	27.8	19.5
Density (gm/cm^3)	2.55	2.71	2.68	2.83	2.54	2.60
Index of refraction (Nd)	1.568	1.545	1.539	1.528	1.561	1.503
Nonlinear coefficient ($10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$)	3.74	2.98	3.48	3.10	3.78	2.90
$dn/dt(20 - 40^\circ\text{C})$ ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	2.9	-0.5	8.6	-5.3	2.9	-6.8
Thermal coefficient of optical path (20 - 40 $^\circ\text{C}$)($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	+8.0	+2.7	+4.6	+0.6	8.0	—
Transformation point ($^\circ\text{C}$)	518	367	455	485	468	—
Thermal expansion coefficient (20 - 40 $^\circ\text{C}$)($10^{-7}/^\circ\text{C}$)	90	104	86	127	92.6	138
Thermal conductivity ($\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$)	1.30	0.84	1.19	—	1.35	0.67
Specific heat ($\text{J}/\text{g } ^\circ\text{C}$)	0.93	0.81	0.71	0.75	0.92	0.57
Knoop hardness	600	418	497	321	497	—
Young's modulus (kg/mm^2)	8570	7123	6910	5109	6249	—
Poisson's ratio	0.24	0.24	0.237	0.258	0.24	0.27



الشكل 5.2. جزء من مخطط مستويات الطاقة لـ Nd^{3+} في الزجاج

بخلاف الكثير من البلورات، يكون تركيز الايونات الفعالة في الزجاج اعلى بكثير. حد التشغيل العملي يعين بعمر الفلوريسنت وبالتالي كفاءة الانبعاث الاستثنائي، تقل بزيادة التركيز. في زجاج السليكا النقصان يصبح ملحوظا عند تركيز 5% من Nd_2O_3 .

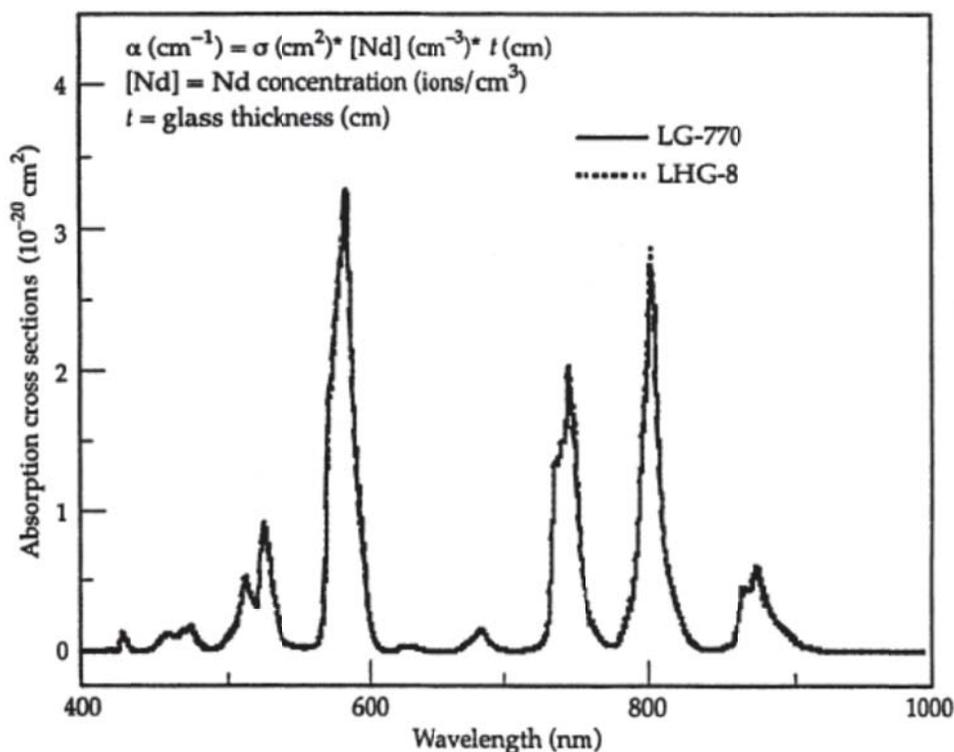
الشكل 5.2 يوضح مخطط مبسط لمستويات الطاقة لـ $Nd:glass$. ايون Nd^{3+} في الزجاج يمثل نظام المستويات الاربعة. المستوى العلوي لليزر الموضح في الشكل 5.2 هو المركبة الادنى في المستوى $4F_{3/2}$ بمتوسط عمر انبعاث تلقائي في حدود بضع مئات ميكروثانية. والمستوى الأدنى في انتقال الليزر هو



المستوى الأدنى في الزوج $^4I_{11/2}$ المتعدد. المجموعة $^4I_{11/2}$ تفرغ تلقائياً بواسطة انتقالات الفونون الغير مشعة إلى المستوى الارضي $^4I_{9/2}$ والذي يقع في حدود 1950cm^{-1} للأسفل.

ولان الفرق كبير بين مستوى الليزر الادنى ومستوى الطاقة الارضي حتى في درجات الحرارة العالية فانه لا يوجد تعداد في مستوى الطاقة الادنى لليزر ولهذا لا يكون هناك أي تراجع في كفاءة الليزر. بالإضافة إلى اتساع خط الفلوريسنت في ايونات النيوبيديوم في الزجاج غير حساس للتغير في درجات الحرارة، فان انخفاض قدره 10% يلاحظ عند الانتقال من درجة حرارة الغرفة إلى درجة حرارة النيتروجين المسال. ونتيجة لهذه الخاصيتين، فانه من الممكن تشغيل ليزر الزجاج المطعم بالنيوبيديوم بتغير طفيف في الاداء في مدى كبير من درجات الحرارة يتراوح بين -100 إلى $+100^\circ\text{C}$.

الشكل 6.2 يوضح حزم الضخ في Nd:glass. بمقارنة الشكل 6.2 مع الشكل 4.2 نلاحظ موضع قمة الامتصاص في Nd:YAG و Nd:glass تكون تقريبا نفسها، ولكن في Nd:glass القمة اكثر اتساعا وذات تركيب اقل دقة بالمقارنة مع Nd:YAG.



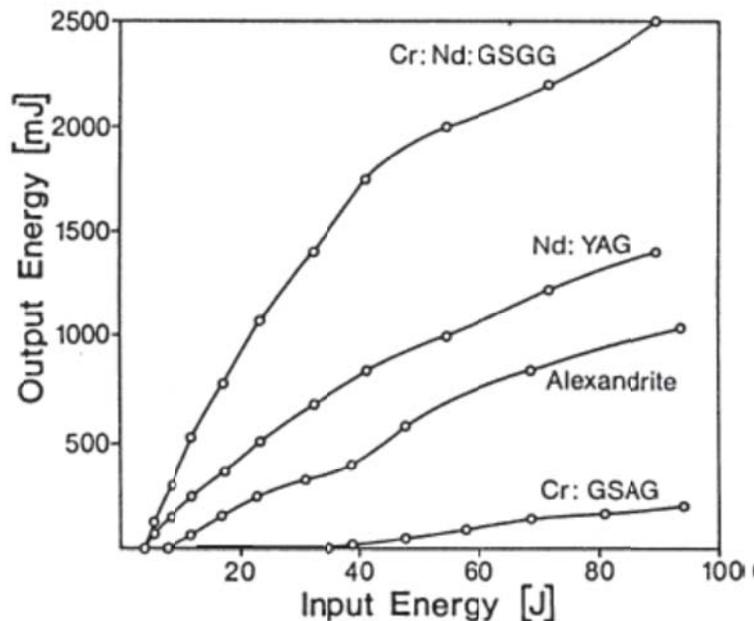
الشكل 6.2. طيف الامتصاص لنوعين من زجاج الفوسفات [2.58]



مصادر البيانات على ليزر الزجاج. مراجعة مفيدة على ليزرات الزجاج يمكن ان نجدها في المراجع [2.1, 2, 59, 60]. وستجد العوامل مدرجة في قوائم بيانات المصانع المنتجة لـ Nd:glass.

Nd:Cr:GSGG 3.3.2

محاولات عديدة بعد اختراع ليزر Nd:YAG تم اجراؤها لزيادة امتصاص طاقة الضخ الناتجة عن الفلاش من خلال ادخال تطعيم ثاني يسمى sensitizer لزيادة الحساسية في بلورة الليزر. ووجد ان Cr^{3+} يعمل ك sensitizer لأنه يحتوي على حزمة امتصاص واسعة يمكن ان تزيد كفاءة امتصاص كافة الضوء في المنطقة المرئية من الطيف. ومبدأ تحسين الكفاءة من خلال التطعيم الثاني في بلورة ليزر الـ Nd بواسطة ايونات Cr^{3+} يعتمد على امتصاص طاقة الضخ من خلال الحزمة العريضة في Cr وانتقال الطاقة غير المشع إلى ايونات Nd. لم يلحظ أي زيادة في الكفاءة في بلورة YAG بسبب عملية الانتقال الغير فعالة. ولكن اكتشف [2.61,62] ان كفاءة انتقال تصل إلى 100% تقريبا يمكن ان تحدث في حالة التطعيم الثاني لبلورة GSGG. في Nd:Cr:YAG فان الانتقال $Cr^{3+} \rightarrow Nd^{3+}$ يجب ان يكون له زمن اقل من 6.2ms لمنع Cr^{3+} من ان يكون sensitizer فعال، لان زمن الانتقال الاقل من 230 μ s وهو زمن اضمحلال فلوريسنت الـ Nd^{3+} . في Nd:Cr:GSGG فان زمن الانتقال $Cr^{3+} \rightarrow Nd^{3+}$ وجد انه يساوي 17 μ s [2.62]. هذا يعود إلى الانزياح إلى اللون الاحمر في حزمة الطاقة 4T_1 في Cr^{3+} . ووجد ان تحسن كفاءة الضخ لا تعتمد على تركيز Cr في المدى من $1-2 \times 10^{20}/cm^3$ [2.63].



الشكل 7.2. الطاقة الناتجة مقابل الطاقة الداخلة لـ Cr:Nd:GSGG، Nd:YAG و alexandrite و

[2.64] Cr:GSGG

الشكل 7.2 يوضح الكفاءة العالية التي يمكن الوصول لها في هذه المادة بالمقارنة مع Nd:YAG وليزر tunable مثل alexandrite و [2.64] Cr:GSGG. والتجارب اجريت على تجويف ليزر ببيضاوي الشكل مغطى بالفضة باستخدام ضوء فلاش $5 \times 75 \text{ mm}^2$. حيث قضيب الليزر ذو ابعاد $6 \times 75 \text{ mm}^2$ مثبت في مذبذب ليزر مع وجود output coupling optimized لهذا النوع من الليزر. كفاءة ضخ الفلاش في Nd:Cr:GSGG كانت حوالي مرتين بالمقارنة مع Nd:YAG.

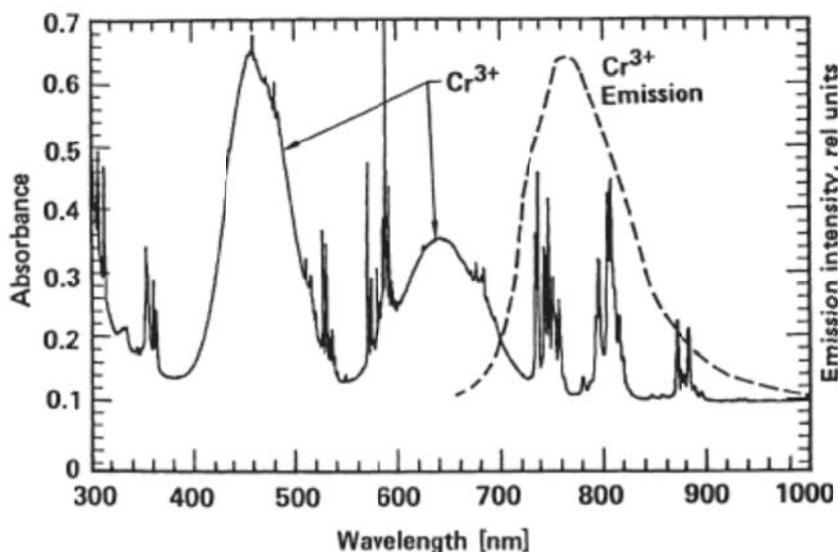
التوضيح والشرح للكفاءة العالية في حالة التطعيم المزدوج GSGG موضحة في الشكل 8.2، والذي يوضح طيف الامتصاص لهذه المادة. حيث يظهر حزمتي امتصاص لـ Cr^{+3} لهما قمتين عند 540 و 640nm تغطيان منطقة كبيرة في الطيف المرئي كما تظهر الخطوط الطيفية لـ Nd.

كفاءة الضخ العالية في Nd:Cr:GSGG لا تعني ان يكون النظام ذو كفاءة افضل لان Nd:Cr:GSGG يظهر تبثير حراري قوي ويعاني من اجهاد birefringence، بالمقارنة مع Nd:YAG.



بلورة Nd:Cr:GSGG لها موصلية حرارية اقل بحوالي 2.5 مرة بالمقارنة مع Nd:YAG. اضافة إلى ان حزمة الامتصاص الحمراء والزرقاء في Cr تنتج عيوب حرارية عالية لوجود فرق كبير بين طاقة الضخ وفوتونات الليزر. ونتيجة لذلك، العدسة الحرارية تكون اكثر تأثيرا بحوالي 6 إلى 9 مرات بالمقارنة مع Nd:YAG هذا بالإضافة إلى birefringence بحوالي 3 اضعاف عن ما هو في Nd:YAG الناتج عن التأثير الحراري [2.66–68].

ولهذا، اذا كان الالم هو شدة الاشعة وليس الطاقة الناتجة، فان التحسين في كفاءة الضخ الضوئي تعتبر ميزة في حالة Nd:GSGG بالمقارنة مع Nd:YAG التي تنقص بسبب التشويه الكبير الحادث بسبب التأثير الحراري. والقياسات في مختبر الباحث بينت انه في حالة نبضة واحدة وعند تشغيل بتردد منخفض فان شدة الاشعة في نظام GSGG اكبر بمرتين من نظام YAG. وعند زيادة تردد النبضات يصبح هذا الفرق اقل وكذلك شدة الاشعة تصبح تقريبا متساوية في النظامين عند تردد 25Hz لنظام Q-switched عند طاقة خارجة مقدارها 100mJ.



الشكل 8.2. طيف الامتصاص لـ Cr:Nd:GSGG [2.65]

وبدمج عدسة حرارية متقدمة واستخدام تقنيات تعويض للـ birefringence، يمكن الحصول على جودة افضل لشعاع ليزر Nd:Cr:GSGG واداء مستقر على نطاق تشغيل واسع [2.68]. ينتج الليزر نبضات

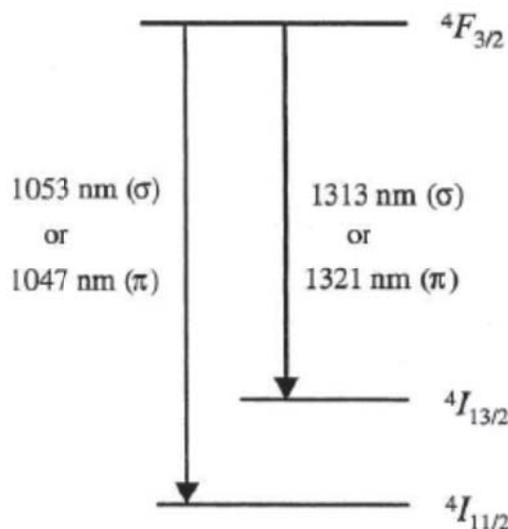


بطاقة تصل إلى 150mJ بتردد يصل إلى 20Hz تقريبا. تم تعديل تأثير العدسة الحرارية والاستيجماتيزم باستخدام تلسكوب اسطواني وعدسة سالبة بجوار المرآة الخلفية. اما birefringence فقد تم تصحيحها بشكل جزئي بإضافة مرآة ثالثة ومدور فارادي Faraday rotator. وهذه تسمى مذبذب مشترك reentrant resonator، كما ان تقنية تعويض العدسة الحرارية يمكن ان تستخدم في أي نوع من انواع ليزرات الحالة الصلبة وسوف نناقشها في الشبتر السابع بالتفصيل.

Nd:YLF 4.3.2

البلورة $Nd^{3+}:LiYF_4$ لها العديد من الميزات التي تجعلها اكثر تطورا من Nd:YAG في الكثير من التطبيقات. طبيعة الـ birefringence في هذه البلورة احادية المحور تسيطر على الـ birefringence المستحثة حراريا والشعاع المستقطب يمنع الخسارة الناتجة عن ازالة الاستقطاب حراريا في قضيب الـ YAG.

الانتقال في Nd:YLF عند طول موجي 1053nm يتطابق مع قمة الحويلة للـ Nd المطعم بالفوسفات والزجاج الفلوروفوسفات. وحيث ان Nd:YLF يمكن ان يضح بشكل مستمر cw ويعمل mode-locked، فان مذبذب Nd:YLF يعطي شعاع ليزر مستقر لمجموعة محددة من النبضات القصيرة. ولهذا السبب يستخدم Nd:YLF في المذبذب الرئيسي لمكبر الـ Nd:glass.



الشكل 9.2. مخطط مبسط لمستويات الطاقة في Nd:YLF

كما ان هذه المادة تمتلك مزايا اخرى للضخ بواسطة ليزر الدايدود لان عمر الفلوريسنت في Nd:YFL اكبر بمرتين من Nd:YAG. ليزر الدايدود محدود الطاقة ولهذا فان زمن ضخ كبير يعوض بزمن فلوريسنت اطول.

للضخ بواسطة ليزر الدايدود، يوجد في Nd:YLF ثلاثة قيم للامتصاص عند 792 و 797 و 806nm [2.69]. وتكون القيمة العظمى للامتصاص عند الطول الموجي 792nm ولكن ليزر الدايدود cw ذو الطاقة العظمى يتوفر عند طول موجي 806nm. في بعض ليزرات Nd:YLF اختير الطول الموجي 797nm للضخ كحل وسط [2.70].

الشكل 9.2 يوضح مخطط لمستويات الطاقة لـ Nd:YLF. كل الخطوط تحدث عند نفس المستوى العلوي $4F_{3/2}$. وبالاعتماد على الاستقطاب، فان خطين يحدثان حول $1.05\mu\text{m}$ و $1.3\mu\text{m}$. الـ birefringence لـ Nd:YLF يجعل الحصييلة لهذه الخطوط دالة في استقطاب الليزر. على سبيل المثال، بمستقطب للتجوييف الداخلي لليزر يمكن اختيار اما الانتقال 1047nm (الشعاع الغير عادي extraordinary beam) أو الانتقال 1053nm (الشعاع العادي ordinary beam). ونفس الشيء يمكن ان يتم للانتقالين عند $1.3\mu\text{m}$,



ولكن خط الليزر $1.05\mu\text{m}$ يجب ان يتوقف. والسبب الرئيسي في حدوث الليزر في Nd:YLF عند $1.3\mu\text{m}$ هو لإنتاج الضوء الاحمر [2.71, 72].

خواص المادة لـ Nd:YLF موضحة في الجدول 6.2. Nd:YLF ضعيف من الناحية الميكانيكية وذات بلورة ناعمة بالمقارنة مع Nd:YAG بموصلية حرارية ومساحة مقطع انبعاث اقل. ولان الخواص الحرارية لـ Nd:YAG افضل بكثير من Nd:YLF، فان البلورة Nd:YLF تستخدم فقط في انظمة الطاقة المنخفضة والمتوسطة.

الجدول 6.2. خواص Nd المطعم لليثيوم واليوتيريوم والفلوريد YLF

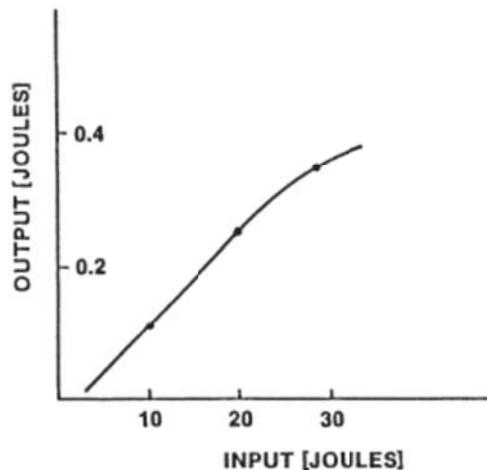
Lasing wavelength (nm)	1053 (σ) 1047 (π)
Index of refraction, $\lambda = 1.06\mu\text{m}$	$n_0 = 1.4481$ $n_e = 1.4704$
Fluorescent lifetime	480 μs
Stimulated emission	$1.8 \times 10^{-19}(\pi)$
Cross section (cm^2)	$1.2 \times 10^{-19}(\sigma)$
Density (g/cm^3)	3.99 (undoped)
Hardness (Mohs)	4-5
Elastic modulus (N/m^2)	7.5×10^{10}
Strength (N/m^2)	3.3×10^7
Poisson's ratio	0.33
Thermal conductivity ($\text{W}/(\text{cm K})$)	0.06
Thermal expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	a axis: 13×10^{-6} c axis: 8×10^{-6}
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	825

لليزرات التي تتطلب طاقة عالية و Q-switch، فان الحصيلة المنخفضة لـ Nd:YLF توفر بعض المميزات عن Nd:YAG. الطاقة المخزنة محدودة في المادتين تتناسب عكسيا مع النسبة في مساحة مقطع الانبعاث الاستثنائي. ولهذا كثافة تخزين الطاقة تكون اكثر في المادة التي لها مساحة مقطع اقل وهي Nd:YLF بالمقارنة مع Nd:YAG.

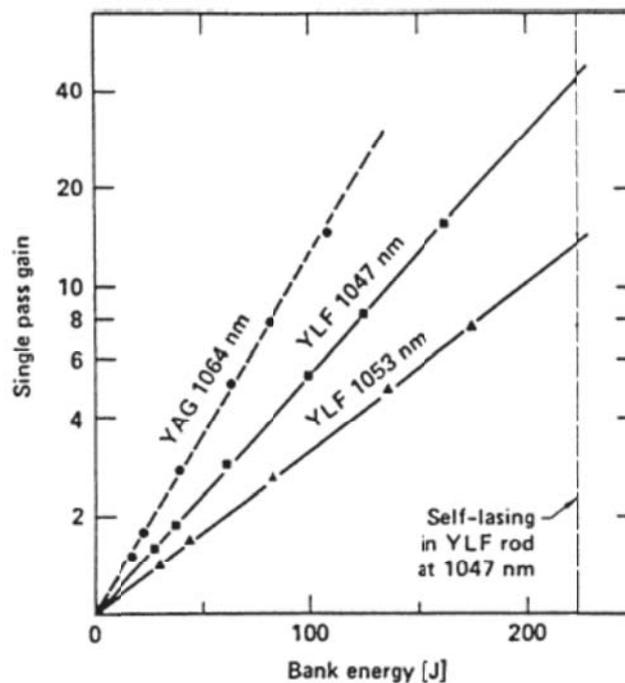
الشكل 2.10 يوضح اداء مذبذب YLF في حالة Q-switched، ينتج طاقة مقدارها 400mJ [2.73]. هذا المستوى من الطاقة يتطلب مكبر اضافي في حالة ليزر Nd:YAG. مذبذب مفرد بطاقة تصل إلى 0.5J Q-switched ومكبر ومذبذب يوفر طاقة تصل الى بضعة جولوات نحصل عليه بتصميم ابسط في حالة



Nd:YLF بالمقارنة مع Nd:YAG [2.74, 75]. العدسة الحرارية الضعيفة في Nd:YLF توفر ميزة إضافية في بعض التطبيقات بالمقارنة مع Nd:YAG.



الشكل 2.10. أداء مذبذب YLF Q-switched (قضيب الليزر $0.25 \times 2.5 \text{ in}^2$ ، والمرآيا الخارجية لها عاكسية 30%، والطول الموجي $1.053 \mu\text{m}$) [2.73]



الشكل 11.2. حصيلية مسار مفرد مع طاقة الضخ لـ YLF والـ YAG [2.74]

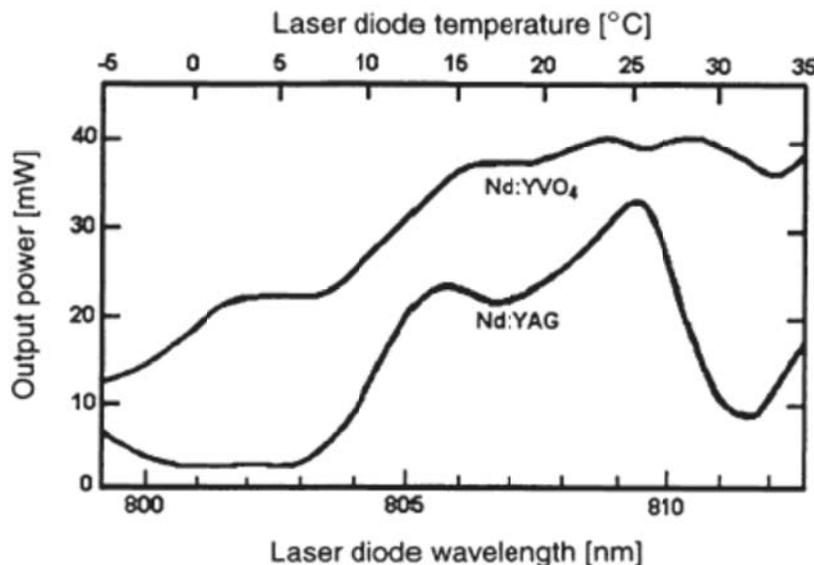


الشكل 11.2 توضح قياس الحصىلة لمسار مفرد مقابل طاقة الضخ للانتقالين [2.74]. القياسات لمكبر Nd:YLF تمت على قضيب YLF قطره 10mm x 76mm بتطعيم Nd بنسبة 1%. تم ضخ البلورة في تجويف فضي ببيضاوي. قراءات الـ YAG تم الحصول عليها باستبدال Nd:YLF بقضيب Nd:YAG قطره 10mm.

Nd:YVO₄ 5.3.2

النيوبيديوم المطعم باليوتيريم والفانديت له خواص طيفية عديدة مناسب جدا للضخ بواسطة ليزر الدايدود. والميزتين الأهم هما مساحة مقطع الانبعاث الاستثنائي الكبيرة والتي تبلغ خمس مرات اعلى من Nd:YAG وحزمة الامتصاص القوية عند 809nm.

تم التعرف على اهمية الـ Nd:YVO₄ كمادة ليزر مهمة في العام 1966 [2.21]. ولكن لا يمكن ان تنمو البلورة بدون ان لا يكون فيها مراكز تشتت أو عيوب امتصاص ذات مراكز لونية. عدم توفر بلورات بجودة عالية وبحجم مناسب لضخ الفلاش تعتبر عقبة اساسية لمزيد من التطور. الحصىلة العالية التي يمكن الوصول لها في Nd:YVO₄ والامتصاص القوي لضخ اشعاع الدايدود يتطلب بلورات بطول بضعة ملليمترات. يمكن الحصول على مادة تصلح لتشغيل ليزر بطاقة عالية وبجودة بصرية كبيرة عند التخلص من قيد حجم البلورة وبالمزيد من التحسينات في عملية نمو البلورة.



الشكل 12.2. الطاقة الناتجة من ليزر Nd:YVO₄ وليزر Nd:YAG كدالة في درجة حرارة ضخ الدايدود والطول الموجي [2.77]

بلورة الفاندايت هي بطبيعتها birefringent والليزر الناتج مستقطب خطيا على امتداد الاتجاه π الغير عادي. الاستقطاب الناتج له ميزة في انه يتجنب الـ birefringence الغير مرغوب به الناتج عن التأثير الحراري. امتصاص طاقة الضخ في هذه البلورة احادية المحور هي ايضا تعتمد على الاستقطاب. يحدث اقوى امتصاص لضوء الضخ المستقطب في نفس اتجاه الليزر. وجد ان معامل الامتصاص حوالي 7 مرات اعلى بالمقارنة مع Nd:YAG في الاتجاه π . المستويات الفرعية عند $4F_{5/2}$ لحزمة الضخ تكون متحللة بشكل اكبر في Nd:YAG في حين انه في Nd:YVO₄ انفصال Stark يكون اقل والانتقالات المتعددة اكثر تعقيدا. وهذا يؤدي إلى ان منحنى الامتصاص يكون اكثر اتساعا واقل حدة في حالة Nd:YVO₄ بالمقارنة مع Nd:YAG حول الطول الموجي لمصدر الضخ عند 809nm. الشكل 12.2 يعطي توضيحا لشكل منحنى الامتصاص الواسع والميزة لهذه المادة بالمقارنة مع Nd:YAG. ومن هذه البيانات نحصل على ان كفاءة ليزر Nd:YVO₄ اكثر تحملا للتغير في درجات حرارة الدايدود بسبب النطاق العريض للضخ. واذا ما قمنا بتحديد هذه النطاق وتعريفه كمدى للطول الموجي فان على الاقل 75% من طاقة اشعاع الضخ تمتص في سملك مقدراه 5mm من المادة، وبالتالي نحصل على قيمة لـ Nd:YVO₄ 15.7nm وقيمة 2.5nm في [2.78] Nd:YAG



الجدول 7.2 يلخص العوامل المهمة لـ Nd:YVO₄. الميزتين الهامتين في هذه البلورة كما سبق وان اشير لهما هي مساحة مقطع الانبعاث الكبير ومعامل امتصاص اشعاع الضخ عند طول موجي 809nm. ولكن من ابرز العيوب لهذه لبلورة Nd:YVO₄ هو الموصلية الحرارية المنخفضة وعمر الفلوريسينت القصير.

الموصلية الحرارية المنخفضة (تقريبا ثلث Nd:YAG) تمنع تبديد جيد للحرارة. والشقوق الناتجة عن الحرارة في البلورة تصدر مشكلة كبيرة عند استخدام طاقة تشغيل عالية. وهذا العائق يمكن التغلب عليه باستخدام بلورات بتطعيم منخفض كما سيتم مناقشته في الاسفل.

الجدول 7.2. خواص المادة لـ Nd:YVO₄ [2.78–80]

Laser cross section	$15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
Laser wavelength	1064.3 nm
Linewidth	0.8 nm
Fluorescence lifetime	100 μs
Peak pump wavelength	808.5 nm
Peak absorption coefficient at 808 nm (cm^{-1})	34 (π polarization) 10 (σ polarization)
Nd doping	1% (atomic Nd)
Modulus of elasticity	133 Gpa
Tensile strength	53 MPa
Thermal conductivity	0.05 W/cm K
Poisson ratio	0.33
Knoop hardness	480 kg/mm ²

كما هو موضح في المعادلة (65.3) فان طاقة الضخ تصل إلى الحالة الحرجة لتشغيل cw تتناسب عكسيا مع مساحة مقطع الانبعاث σ ومتوسط العمر τ_f . مساحة المقطع الكبير في Nd:YVO₄ تتغير جزئيا بمتوسط العمر القصير. ولكن حاصل ضرب ($\sigma\tau_f$) لا يزال اكبر من Nd:YAG، وهذا يجعل الحالة الحرجة لـ cw منخفضة.

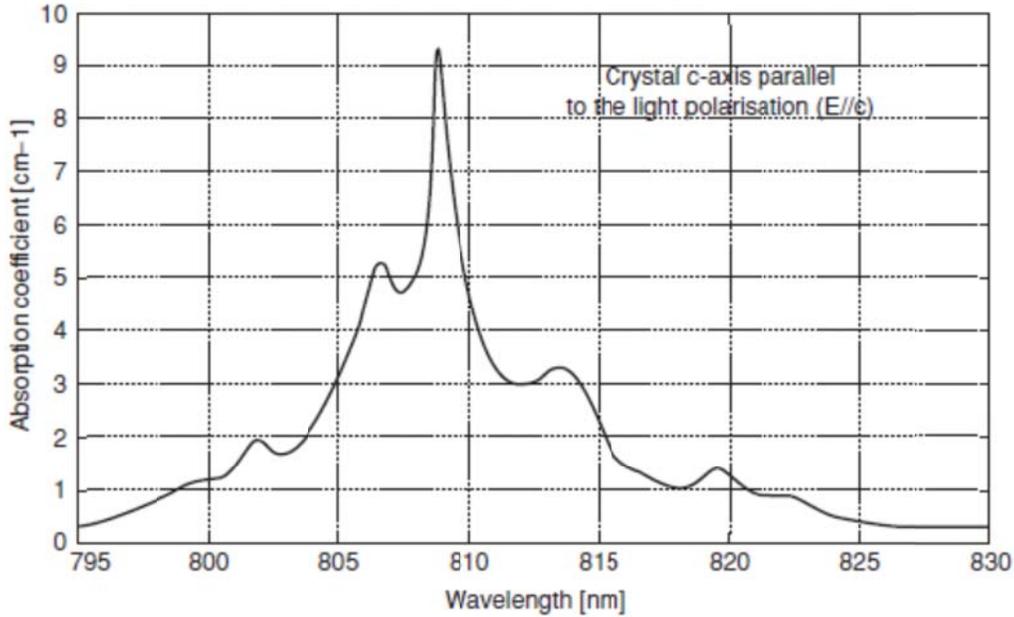
ايونات Nd³⁺ في YVO₄ لها مساحة مقطع امتصاص كبيرة عند الطول الموجي 809nm، مع قيمة عظمى تساوي تقريبا $2.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ [2.80]. ولهذا بتطعيم بنسبة 1% Nd أو $1.26 \times 10^{20} \text{ Nd ions/cm}^3$ يكون معامل الامتصاص 34 cm^{-1} وقيمة اعلى مساحة مقطع للامتصاص لـ NdYVO₄ في الاتجاه π يساوي تقريبا سبعة مرات اكبر من Nd:YAG عند طول موجي 808nm ($4.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$).



الامتصاص القوي لإشعاع ليزر الدايدود المستخدم في الضخ عند الطول الموجي 809nm يسمح باستخدام بلورات قصيرة تمتص معظم الأشعاع. وحيث ان حيود شعاع الضخ اكبر بكثير من نمط التذبذب، فان البلورة قادرة على امتصاص اشعاع الضخ في مسافة صغيرة تناظر spot size لنمط التذبذب.

بالرغم من الامتصاص العالي والمنطقة النشطة القصيرة مفضلة من وجهة تطابق الانماط، فانه في المقابل يتطلب تشتت حراري جيد في حالة التشغيل بطاقة عالية. حجم ضخ صغير يزيد التدرج الحراري وينتج اجهاد ميكانيكي. وقد وجد ان حد طاقة الضخ التي تسبب تشقق في بلورة Nd:YVO₄ يتناسب عكسيا مع تركيز التطعيم [2.81]. ولهذا السبب فان تشغيل بطاقة ضخ عالية يصل إلى 30W يكون افضل تركيز لبلورة Nd:YVO₄ هو في حدود 0.25 إلى 0.4% Nd [2.82].

الشكل 13.2 يصف E||c المستقطبة في بلورة طولها 10mm بتطعيم بنسبة 0.27% [2.83]، قمة الامتصاص تتركز عند 808.7nm بخط اتساعه عند درجة حرارة الغرفة هو 2.5nm عند FWHM. والقاعدة العريضة للامتصاص تنتج بسبب الخطوط الطيفية الضعيفة لـ Nd.

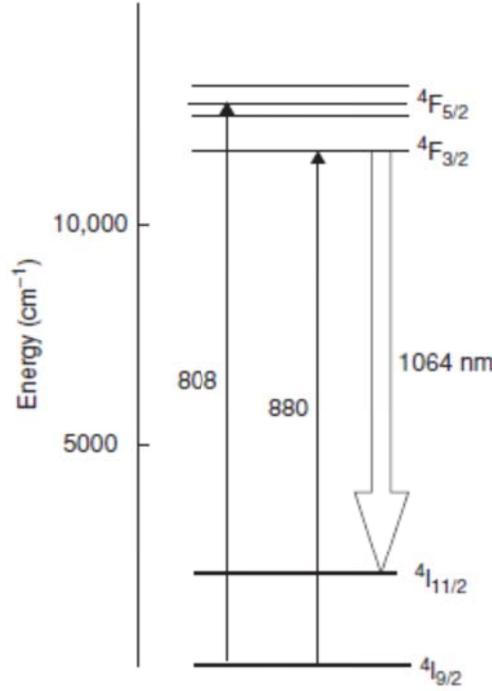


الشكل 13.2. طيف الامتصاص لتطعيم بنسبة 0.27% في بلورة Nd:YVO₄ في منطقة الضخ 808nm

[2.83]



في محاولة لتقليل الحرارة في بلورة Nd:YVO₄ استخدمت عدة أنظمة [2.84, 85] للضخ عند 880nm مباشرة إلى مستوى الليزر العلوي كما هو موضح في الشكل 14.2. انبعاث الليزر في Nd:YVO₄ عند طول موجي 1064nm هو انتقال من $^4F_{3/2}(R_1) \rightarrow ^4I_{11/2}(Y_1)$. بلورة Nd:YVO₄ يضخ في الامتصاص القوي للمستوى $^4F_{5/2}$ عند طول موجي 809nm.



الشكل 14.2. ضخ Nd:YVO₄ عند 808nm أو 879nm

طريقة اخرى بديلة لضخ Nd:YVO₄ هو $^4I_{9/2}(Z_1) \rightarrow ^4F_{3/2}(R_1)$ عند طول الموجي 880nm. الضخ المباشر لمستوى الليزر العلوي يؤدي إلى تقليل العيوب الكوانتية الحرارية الناتجة عن الاختلافات الصغيرة في الاطوال الموجية للضخ وشعاع الليزر. الضخ عند طول موجي طويل يزيد كفاءة العيوب الكوانتية (معامل ستوكس η_s) من 0.76 إلى 0.83. وقد سجلت قيمة 0.75% كفاءة باستخدام الضخ بواسطة ليزر الداويد عند طول موجي 880nm لبلورة Nd:YVO₄ بسبك 1mm مطعمة بنسبة 1% [2.84].

خواص Nd:YVO₄ يمكن ان تظهر في العديد من أنظمة الليزر التجارية المصممة على نظام الضخ بواسطة مصفوفة من الديودات المتصلة بألياف الفايبر. في الحقيقة Nd:YVO₄ هي مادة مناسبة للتشغيل



بنظام cw بطاقة ليزر تصل إلى 30W [90–2.86]. هذه الانظمة غالبا تكون مدمج فيها مضاعف التردد لتعطي ليزر بطول موجي 532nm. وتكون انظمة الليزر التجارية تلك مصممة لتضخ بشعاع مركز مما يجعل من الصعوبة الحفاظ على خصر شعاع صغير على مسافة تزيد عن بضع مليمتترات. في حالة المادة مثل Nd:YVO_4 ، والتي لها معامل امتصاص كبير بالإضافة إلى حصيلة كبيرة تعتبر ميزة هامة.

كفاءة عالية مدهشة تم الوصول لها في Nd:YVO_4 كما هو موضح في الامثلة المقدمة في الاقسام 3.6.3 و 3.2.6. لضخ cw مع تشغيل بـ Q-switched متكرر، فان العمر القصير لمستوى الطاقة العلوي لليزر في Nd:YVO_4 يتطلب معدل ضخ نبضات بتردد يتراوح بين 50 إلى 100Hz للوصول إلى متوسط طاقة قريب من طاقة cw. الحصيلة العالية مع عمر الفلوريسنت القصير ينتج نبضات Q-switched قصيرة نسبيا بالمقارنة مع Nd:YAG و Nd:YLF . عرض النبضة في انظمة Q-switched المتكررة يصل إلى 10ns.

ومثل معظم البلورات المطعمة بـ Nd، فان Nd:YVO_4 يمكن ان يستخدم لتوليد اشعاع بطول موجي $1.34\mu\text{m}$. وعند هذا الطول الموجي تنخفض الكفاءة بالمقارنة مع تشغيل الليزر عند طول موجي $1.06\mu\text{m}$ وتكون الحرارة المحملة اعلى نتيجة العيوب الكوانتية العالية. وتصل كفاءة ليزر Nd:YVO_4 إلى 40% وتنتج 7.3W شعاع بطاقة تصل إلى 7.3W [2.83].

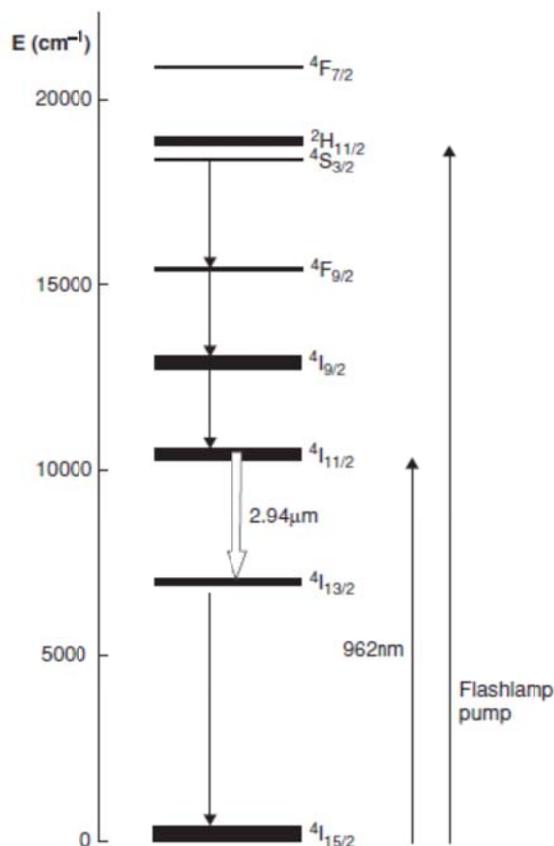
4.2 ليزرات Er

اداء ليزر الاربييوم ليس مدهشا من حيث الكفاءة والطاقة الناتجة. ولكن يمتلك الاربييوم جاذبية خاصة للطول الموجي الذي يعمل عنده. بلورة مثل YAG مطعمة بالاربييوم بنسبة عالية تنتج شعاع ليزر بطول موجي $2.9\mu\text{m}$ و Er مطعم بزجاج الفوسفات يولد شعاع بطول موجي $1.54\mu\text{m}$. كلا من هذين الطولين الموجيين يمتصا بواسطة الماء، وهذا يؤدي إلى اهتمام كبير من ناحية التطبيقات الطبية في حالة ليزر $2.9\mu\text{m}$ وكذلك لسلامة منظار العين المستخدم في التصويب العسكري في حالة الاطوال الموجية القصيرة.



Er:YAG 1.4.2

في العام 1975 باحثون روسيون [2.91] اكتشفوا تشغيل الليزر في درجة حرارة الغرفة في تطعيم بنسبة عالية في Er:YAG، أي ان تركيز الاربييوم في حدود 50%. اشعاع الليزر



الشكل 15.2. مخطط مستويات الطاقة لـ Er:YAG عند ليزر يعمل على طول موجي 2940nm

يحدث عند طول موجي 2940nm. هذا الليزر له اهمية خاصة لان طوله الموجي يتطابق مع امتصاص الماء. الامتصاص بواسطة الماء في الاغشية الحية كبير جدا (اكبر من 3000cm^{-1})، مما يجعل له اهمية كبيرة في التطبيقات الطبية مثل الجراحة التجميلية.

الشكل 15.2 يوضح مستويات الطاقة لـ Er:YAG. انتقال الليزر عند 2940nm بين المستويين $4I_{11/2}$ و $4I_{13/2}$ لا يون الـ Er^{3+} . هذا النظام نظام ليزر رباعي المستويات لان مستوى الليزر الأدنى ينفصل عن



المستوى الارضي $4I_{15/2}$ ب 7000cm^{-1} . مساحة مقطع الانبعاث الاستحثاثي لهذا الليزر هو $\sigma = 3 \times 10^{-20} \text{cm}^2$. بالرغم من متوسط العمر القصير للمستوى ($4I_{11/2}$) بالمقارنة مع المستوى النهائي للانتقال ($4I_{13/2}$)، فان امكانية حدوث انتقال ليزر بطول موجي $2.9\mu\text{m}$ عند درجة حرارة الغرفة ممكنا. نتيجة لذلك فان مساحة مقطع الاسترخاء بين ايونات Er^{3+} المجاورة في المستوى $4I_{13/2}$ فان عدد كبير من تعداد المستوى الادنى لليزر تعاد إلى المستوى العلوي لليزر، وهذا يساعد على التغلب على مشكلة قصر عمر مستوى الطاقة للمستويين [93, 2.92]. نبضات ضخ طويلة نسبيا تكون ضرورية لان عملية الضخ في Er:YAG تستغرق حوالي $100\mu\text{s}$ للضخ عند طول موجي 962nm لتجعل النظام يعمل بنمط تشغيل cw. ولهذا السبب هناك اقل فترة ضخ والا فان كفاءة النظام سوف تقل.

افضل عملية ضخ هي الاثارة المباشرة للمستوى الليزر العلوي $4I_{11/2}$ بواسطة ليزر الدايدود الذي طوله الموجي 962nm . معامل الامتصاص لـ Er:YAG لاشعاع الدايدود عند هذا الطول الموجي هو 14cm^{-1} . الاثارة بواسطة الضوء تكون عند اطول موجية قصيرة في المستويات $4F_{7/2}$ ، و $2H_{11/2}$ ، و $4S_{3/2}$ كما هو موضح في الشكل 15.2. الامتصاص الرئيسي في هذه المستويات الثلاثة يحدث بين 480nm و 530nm . الاثارة من مستويات الطاقة العالية في Er^{3+} تنتقل للأسفل إلى مستوى الليزر العلوي.

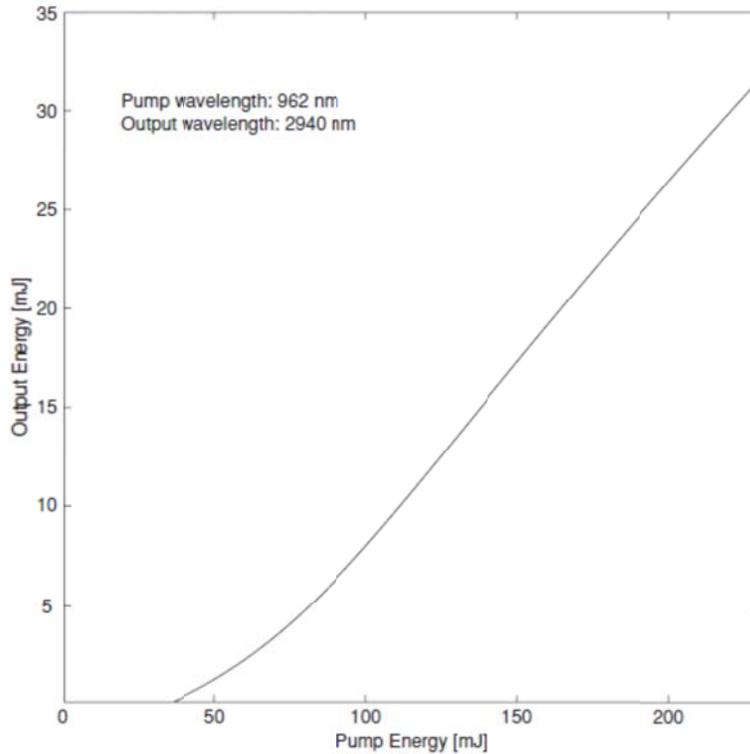
الضخ بالضوء الفلاشي لليزر Er:YAG يؤدي إلى نظام ليزر بكفاءة منخفضة. وذلك بسبب العيوب الكوانتية لان مستوى الليزر العلوي للانتقال 2940nm يضح اساسا بواسطة الضوء عند طول موجي 600nm . مثال نموذجي على ذلك هو قضيب ليزر Er:YAG طوله 75mm وقطره 6.25mm مطعم بنسبة 50% يضح بواسطة مصباحين ضوء فلاشي بقطر 7mm في تجويف بيضاوي مزدوج مبطن بالفضة [2.94]. في نبضة زمنها $170\mu\text{s}$ ، ينتج الليزر طاقة مقدارها 600mJ عندما تكون طاقة النبضة 360mJ . تردد النبضات هو 1Hz . عند تردد نبضات عالي فان تأثير العدسة الحرارية يسبب انخفاض للكفاءة وتشويه في شكل شعاع الليزر الناتج. تزداد كفاءة النظام من 1% إلى حوالي $4-5\%$ عند استخدام ضخ الليزر دايدود. كمثل على ذلك، الشكل 16.2 يوضح خصائص العلاقة بين الخارج والداخل لقرص سداسي الشكل من بلورة Er:YAG تضخ بواسطة ثلاثة ليزرات دايدود [2.95]. هذا الشكل الهندسي بالتحديد يزود مناطق انعكاس داخلي متعددة في شعاع الليزر. ليزر الدايدود الثلاثة تشع عند طول موجي 962nm باتساع طيفي 5nm عند FWHM. هذه الدايدودات تشع نبضات $400\mu\text{s}$ عند تردد 100Hz . الطاقة الكلية الناتجة 32mJ عند كانت طاقة الضخ للبلورة كانت 230mJ . وهذا يناظر كفاءة مقدارها 14% .



اعلى كفاءة يمكن الحصول عليها في ليزر Er:YAG في تصميم يعرف باسم monolithic. تم الحصول على طاقة في حدود 1W بنمط cw [2.98]. بجانب بلورة Er:YAG، بلورة Er:YLF تستخدم بكثرة لتوليد شعاع ليزر بطول موجي 2810nm. تطعيم بنسبة 15% لبلورة Er:YLF، بضخ جانبي بواسطة ضوء دايود بطاقة 40W عند طول موجي 980nm، ينتج ليزر بطاقة 4W بنظام cw [2.99]. استخدام شريحة birefringent كوارتز في التجويف الداخلي لليزر لاختيار الطول الموجي يمكن التحكم في الطول الموجي الناتج بين 2700 و 2800nm عند اطوال موجية محدد تقابل الانتقالات بين $^4I_{13/2}$ و $^4I_{11/2}$.

Er:Glass 2.4.2

صنع الاربييوم لينتج ليزر عند طول موجي $1.54\mu\text{m}$ في كلا من زجاج الفوسفات والسليكا. وبسبب نظام الليزر فيه هو نظام ثلاثي المستويات ولان امتصاص طاقة الضخ ضعيفة تم تطعيمه بايونات rare earth للحصول على نظام بكفاءة مقبولة، يتوجب ان يتم sensitized الاربييوم باليوبيريوم اذا كنا نريد الحصول على ليزر عند درجة حرارة الغرفة.



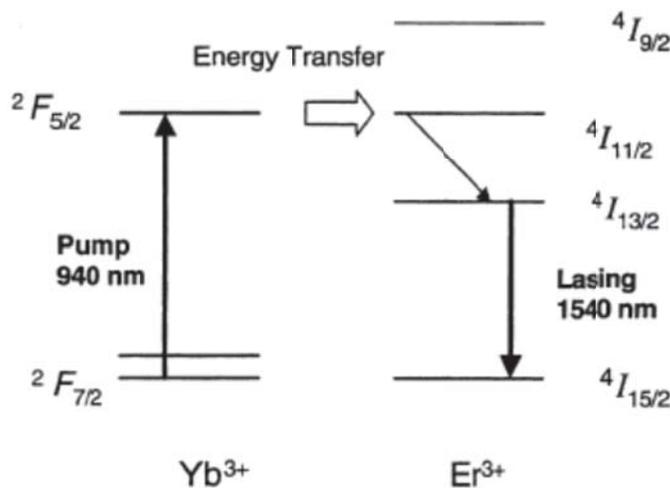
الشكل 16.2. منحنى علاقة الخارج مع الداخل لليزر Er:YAG المضخ بالدايود عند 100pps [2.95]



يتم امتصاص طاقة الضخ بواسطة اليوروبيوم، والذي له حزمة امتصاص بين 0.9 و 1µm، ومن ثم يتحول إلى أيونات الاربييوم. هذا التحول موضح في الشكل 17.2. في التطعيم Er:Yb:glass، الاشعاع من المصباح الفلاشي أو ليزر الدايدود يضخ الانتقال القوي من $^2F_{7/2}$ إلى $^2F_{5/2}$ في ايون Yb^{3+} . وذلك بسبب التداخل بين مستويات الطاقة العليا للـ Yb^{3+} و Er^{3+} ، فان ايونات Yb^{3+} المثارة تنقل الطاقة إلى المستوى $^4I_{11/2}$ في Er^{3+} . ايونات الاربييوم بعد ذلك تسترخي إلى مستوى الليزر العلوي $^4I_{13/2}$ ويحدث الليزر بالانتقال إلى $^4I_{15/2}$.

ينتهي عمل الليزر عند مستوى ستارك في المستوى الارضي. وعند درجة حرارة الغرفة كل افرع مستوى الطاقة $^4I_{15/2}$ تضخ لنفس التعداد، ولهذا تكون ذات نظام ثلاثي بحالة حرجة عالية.

في حالة الضخ بضوء المصباح الفلاشي، فان كفاءة Er:glass يمكن ان تزداد بإضافة Cr^{3+} بالإضافة إلى Yb^{3+} . ايونات Cr^{3+} تمتص طاقة الضوء الفلاشي في مستويين عند 450 و 640nm، وينبعث الاشعاع عند 760nm.



الشكل 17.2. مخطط مستويات الطاقة في التطعيم المزدوج بـ Er و Yb:glass



هذا يسمح للطاقة ان تنتقل من Cr^{3+} إلى المستويات $^4I_{9/2}$ و $^4I_{11/2}$ لـ Er^{3+} و المستوى $^2F_{5/2}$ لـ Yb^{3+} .

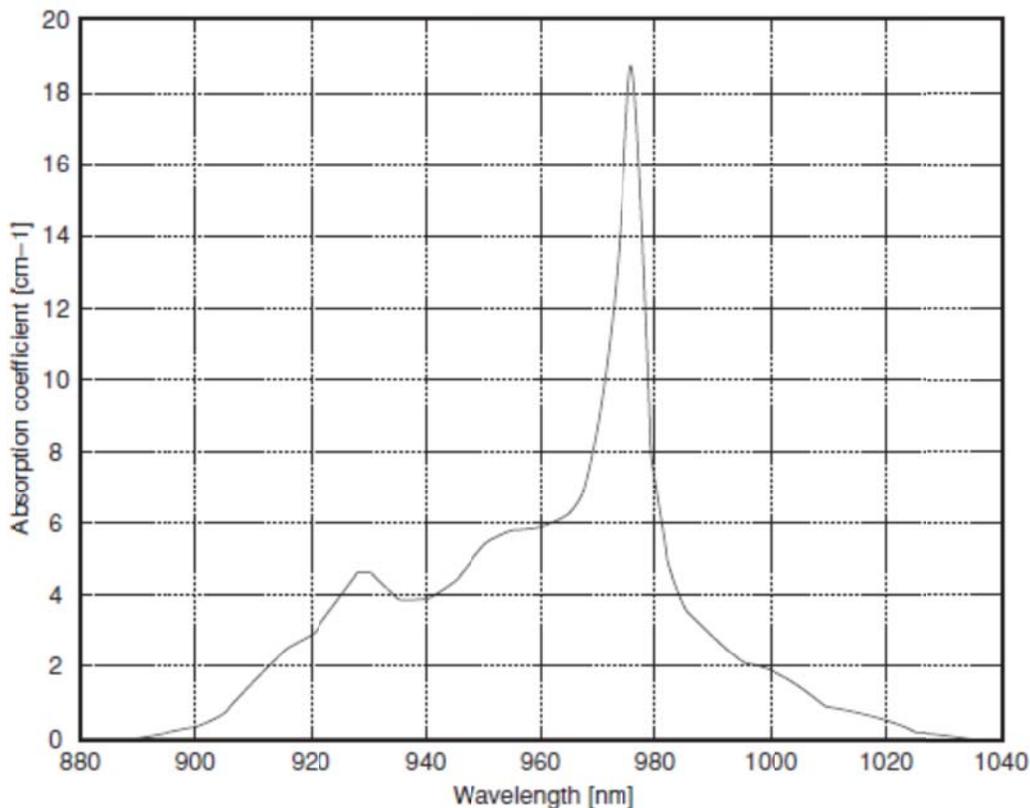
بتطوير ليزر InGaAs، والذي له طيف انبعاث عند 0.9 و $1\mu m$ ، فانه الان من الممكن ان يضخ الانتقال القوي $^2F_{5/2}-^2F_{7/2}$ في Yb^{3+} . الضخ بليزر الدايدود عند طول موجي 940nm ادى إلى تطوير ملحوظ على الكفاءة ومتوسط الطاقة التي يمكن ان نحصل عليها من ليزرات Er:glass.

امتصاص طاقة الضخ بواسطة Yb^{3+} والانتقال الجيد إلى Er^{3+} ممكنا لان معدل الانتقال من Yb إلى Er حوالي 10 مرات اكبر من معدل استرخاء $^2F_{5/2}$ في Yb^{3+} . بالأخص معدل الاسترخاء $^4I_{11/2}$ في Er اقل من $10\mu s$ ، وهذا يسمح بزيادة سريعة في التعداد لمستوى الليزر في Er^{3+} ، في حين تقليل الطاقة الراجعة إلى Yb^{3+} . الزمن اللازم للانتقال الطاقة من Yb^{3+} إلى Er^{3+} ، ومن ثم لـ Er^{3+} للاسترخاء إلى المستوى $^4I_{13/2}$ يسبب تأخر زمني بين نبضة الضخ ونبضة الليزر الخاصة بـ Er:Yb:glass وتعتمد على مستوى طاقة الضخ.

بسبب الاتساع الغير متجانس للانتقال في الزجاج، فان طيف الامتصاص في Er:Yb:phosphate glass متصل، ويسمح بالضخ عند أي طول موجي في المدى من 920 إلى 1000nm كما هو موضح في الشكل 18.2. خواص المادة لـ Er:Yb:glass موضحة في الجدول 8.2. ومتوسط عمر الفلوريسنت الطويل لـ Er^{3+} وطيف الامتصاص الواسع لـ Yb^{3+} يعتبر مناسب جدا للضخ بواسطة ليزر الدايدود.

الضخ بواسطة ليزر الدايدود لـ Er:glass مصمم للتطبيقات العسكرية يعمل عند طول موجي 940nm وليس عند الطول الموجي لقمة طيف الامتصاص الموضح في الشكل 18.2. وعند هذا الطول الموجي، هناك حزمة امتصاص واسعة حيث معامل الامتصاص بين 4 و $6cm^{-1}$. الضخ عند هذه النطاق الطيفي يسمح بالتشغيل لليزر الدايدود للضخ على نطاق واسع من درجات الحرارة بدون الحاجة إلى تحكم في درجة الحرارة. وعند المقارنة مع الضخ بالضوء الفلاشي، فان ضخ ليزر الدايدود اكثر كفاءة وينتج عنه حرارة اقل.

الشكل 19.2 يشرح كفاءة الضخ بواسطة ليزر الدايدود في ليزر Er:Yb: phosphate glass [2.100].



الشكل 18.2. طيف الامتصاص لـ Er:Yb:phosphate glass [2.100]

استخدم قضيب ليزر قطره 2mm وطوله 10mm ليضخ بشكل جانبي بواسطة مصفوفة من ليزرات الدابود. كل مصفوفة كانت تحتوي على حزمة من ثلاثة قطع 1cm ولها باندويدث 7 عند FWHM و اعلى قيمة للإشعاع عند طول موجي 973nm. اتساع النبضة محدود بطاقة مزود الطاقة للقيمة 1ms. عند اعلى قيمة للطاقة الناتجة 20.5mJ، فان الكفاءة البصرية optical-to-optical efficiency له كانت 8.6% والنظام كانت له كفاءة كلية wall plug efficiency تساوي 2.7%.

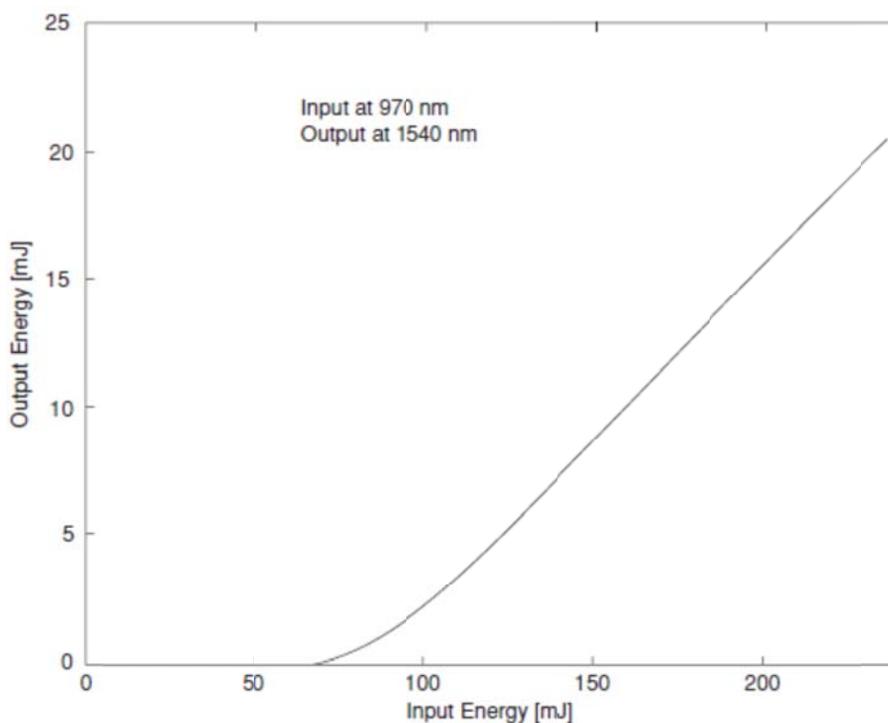
من اشهر تطبيقات ليزر Er:glass جهاز كشف المدى اليدوي hand-held rangefinders. ولهذه التطبيقات فان الليزر يعمل بـ Q-switched. وهذا يتم باستخدام منشور دوراني، أو عاكس داخلي أو صبغة تمتص الاشعاع.



تشغيل ليزر Er:glass بـ Q-switched حتى تردد 50Hz ينتج طاقة مقدارها 14mJ في صورة نبضات بتردد 25Hz [2.101].

الجدول 8.2. خواص المادة للاربييوم المطعم لفوسفات الزجاج

Emission wavelength	1.54 μm
Fluorescent lifetime	8 ms
Index of refraction at 1.54 μm	1.531
dn/dT	$63 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$
Thermal expansion (α)	$124 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$
Thermo-optic coefficient (W)	$-3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$



الشكل 19.2. منحنى علاقة الخارج مع الداخل لليزر Er:Yb:phosphate glass المضخ بالدايود عند

[2.100] 100pps



اتساع نبضة الضخ هي 5ms عندما يعمل ليزر الدايدود عند طول موجي 940nm. قضيب ليزر Er:Yb:glass بقطر 2.5mm وطول 33mm يضخ من الجانب بـ 18 قضيب طول كل منها 1cm. طاقة الضخ الكلية كانت 1.3J. واستخدم للحصول على Q-switch عاكس داخلي. وحيث ان العاكس الداخلي ليس حساس للاستقطاب فان التشويه الحراري الذي قد يسبب خسارة كبيرة في التعداد لا يعتبر مشكلة في هذه الحالة.

ليزر passively Q-switched ينتج طاقة مقدارها 50kw عند 20Hz موضح في المرجع [2.102]. الـ $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ والذي يعمل بـ Qswitch عن طريق الامتصاص المشبع saturable absorber ينتج نبضات 2ns. في هذا التصميم يستخدم شريحة مفردة من ليزر الدايدود بضاقة 4W وتضخ $2 \times 2 \times 3\text{mm}$ Er:doped phosphate glass. الليزر الكلي يمكن يثبت على TO-3 وينتج نبضات بطاقة تصل إلى 100μJ وهي كافية لتطبيقات تصل مداها إلى 2km.

تمت الترجمة في المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

12-9-2010