

紫翠宝石激光输出的温度特性研究*

杨晓东 欧阳斌 李传东 徐 冰 林礼煌

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 理论分析和实验研究表明, 随温度的上升, 紫翠宝石激光器的增益增加、泵浦效率提高、阈值降低。

关键词 紫翠宝石激光器, 有效发射截面, 温度特性。

1 引 言

在激光应用与研究中, 紫翠宝石($\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$)是性能优良的宽带可调谐(701~826 nm)激光介质之一, 也是在可见光范围内得到超短脉冲强激光输出的最理想的工作物质之一^[1]。紫翠宝石是继红宝石和掺铬钇铝石榴石($\text{Cr}:\text{YAG}$)后第三种掺铬离子激光介质^[2, 3]。由于紫翠宝石泵浦带较宽, 荧光寿命长(260 μs)^[3], 饱和能量密度高^[4], 受激发射截面低, 能有效储存高的能量密度, 所以它也是性能优良的激光放大介质。

紫翠宝石激光器温度特性的实验研究已有报道^[5, 6]。本文从 McCumber 所给的紫翠宝石的增益计算公式^[7]出发, 进一步从爱因斯坦关系式进行推导, 得出了紫翠宝石的增益和温度之间的关系, 并通过实验, 验证了紫翠宝石激光输出的温度特性。

2 理论分析

在 701~826 nm 的范围, 紫翠宝石激光器属于共振激光运转。根据 McCumber 的理论^[7], 紫翠宝石激光的增益 $g(\nu)$:

$$g(\nu) = \{N^* - (N - N^*) \exp [(E - E^*)/kT]\} \delta_{e\lambda}, \quad (1)$$

其中 N 、 N^* 分别为总的粒子数和激发态粒子数, E 为光子能量, E^* 为有效光子能量(上能态 T_2 的平均能量), k 为玻耳兹曼常数, T 为介质温度, $\delta_{e\lambda}$ 为紫翠宝石的有效发射截面:

$$\delta_{e\lambda} = f_{\lambda}(\mathbf{k}, E) h^2 c^2 / E^2 n_{\lambda}^2, \quad (2)$$

其中, \mathbf{k} 为波矢, λ 为光子偏振方向, h 为普朗克常数, c 为光速, 函数 $f_{\lambda}(\mathbf{k}, E)$ 是原子从高能态向低能态跃迁时, 在 \mathbf{k} 方向单位立体角上, 每单位能量时, 具有 λ 方向偏振性的光子的发射速率, n_{λ} 为折射率。

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1993年11月1日; 收到修改稿日期: 1994年3月9日

研究在紫翠宝石激光输出的中心波长 750 nm 波长处进行。设紫翠宝石的上能级粒子数为 N_2 , 那么粒子的跃迁速率(从高能态向低能态)为:

$$f_1(\mathbf{k}, E) = g_0 B_{21} \rho_r N_2, \quad (3)$$

g_0 为统计权数, $B_{21} \rho_r$ 表示单位时间粒子从高能态向低能态的受激辐射几率。由爱因斯坦关系式可得:

$$B_{21} = C^3 A_{21} / 8\pi h\nu^3, \quad (4)$$

A_{21} 为单位时间粒子从高能态向低能态的自发辐射几率, 它与上能级寿命 τ 的关系满足 $A_{21} = 1/\tau$ 。将(4)式及 $N_2 = g' \exp(-E/kT)$ (g' 为权重因子)代入(3)式, 得:

$$f_1(\mathbf{k}, E) = g_0 g' \rho_r \frac{C^3}{8\pi h\nu^3 \tau} \exp(-E/kT). \quad (5)$$

令 $g_0 g' = g$, 将(5)式代入(2)式:

$$\delta_{e\lambda}(\mathbf{k}, E) = g \rho_r \frac{h^2 C^5}{8\pi h\nu^3 E^2 n^2 \lambda} \frac{1}{\tau} \exp(-E/kT) \quad (6)$$

从紫翠宝石上能级寿命 τ 与温度 T 的关系^[6], 并对 $\delta_{e\lambda}$ 的数据结果作适当的处理, 得到紫翠宝石在 750 nm 处的有效发射截面 $\delta_{e\lambda}$ 与温度 T 的关系曲线, 如图 1 所示。可见, 就确定波长 750 nm 而言, 随着介质温度的上升, 紫翠宝石的有效发射截面增大。对于其它波长, 同样可以得到相同的结论。

图 2 为紫翠宝石的 Cr^{3+} 振动能级图。室温下, 紫翠宝石激光器在 701 nm 到 826 nm 间可

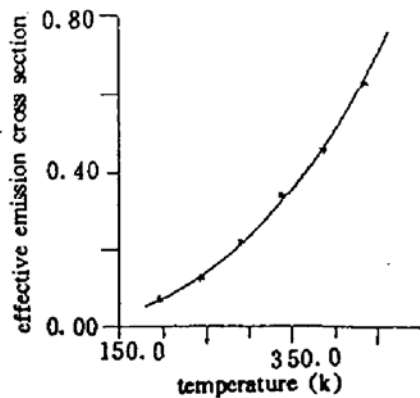


Fig. 1 The temperature dependence of the effective emission cross-section

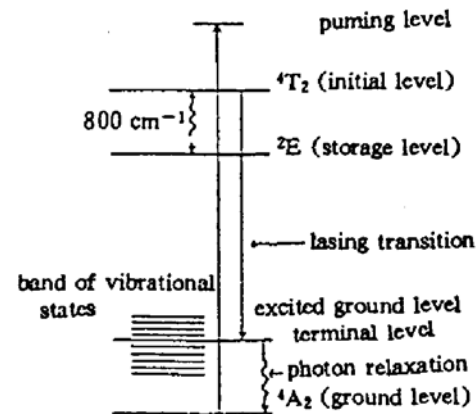


Fig. 2 The four-level model of alexandrite

调谐, 这是一个四能级激光工作系统, 上能级由寿命较短的 $4T_2$ 态和寿命较长的、能量略低的 $2E$ 态两个电子激发组构成。激光跃迁终止在电子基态的振动子能级上, 再通过振动弛豫抽空子能级。泵浦光激发原子到一个电子振动能带, 随后过渡到这能带的底部, 同时损失振动能(这就是激光介质的上能级), 接着受激辐射跃迁到电子基态的振动激发子能级上, 产生激光, 最后在激光下能级的原子, 通过释放振动能量弛豫到基态。当温度升高时, Cr^{3+} 离子在 高能态 $4T_2$ 能级上的占有率增大(与亚稳态 $2E$ 能级的占有率相比较而言), 由(1)式可知, 紫翠宝石的增益增加, 这与其它大部分固体激光器正好相反。

3 实验结果和讨论

实验装置如图 3 示。所用的紫翠宝石棒为 $\Phi 5 \times 50$ mm; 泵浦光源为双氙灯, 置于双椭圆

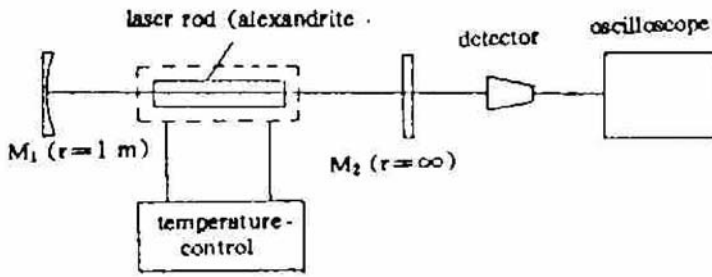


Fig. 3 Experimental setup

激光腔中, 发光时间为 $200 \mu\text{s}$, 工作频率为 1 Hz ; 灯的水冷系统和棒的循环水系统相互独立, 后者由恒温箱控制, 水温可根据实验要求在 $15^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 之间进行调节。谐振腔为平凹腔结构, 输出腔板 $M_1 (r = \infty)$ 在 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 的反射率为 20% , 后腔板 $M_2 (r = 1 \text{ m})$ 在 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 全反, 激光器腔长为 52 cm 。输出端用示波器和能量计及光谱仪进行测试。

将循环水的温度控制在某一点处, 然后改变氙灯的工作电压, 即改变激光系统的泵浦能量。在自由振荡的条件下, 研究了激光输出特性与温度的关系。

用“WDG-30”光谱仪对输出激光的光谱进行测定, 结果在 $700 \sim 800 \text{ nm}$ 范围得到的输出最强, 谱线中心在 750 nm 处, 另外在 650 nm , 660 nm , 680 nm 处也有较弱的输出, 受光谱仪限制, 可见光以外的谱线未作观察。

利用示波器, 观察了在不同泵浦能量和不同温度下的激光输出波形, 如图 4 所示。实验中, 输出激光脉宽始终保持在 $1.3 \mu\text{s}$ 左右, 并不随输入能量和温度的变化而有明显的变化, 也不随腔长的改变而变动。

利用示波器, 观察了在不同泵浦能量和不同温度下的激光输出波形, 如图 4 所示。实验中, 输出激光脉宽始终保持在 $1.3 \mu\text{s}$ 左右, 并不随输入能量和温度的变化而有明显的变化, 也不随腔长的改变而变动。

用一个对可见光敏感的“PT-1”型能量计测量激光的输出能量。使循环水温度分别恒定在 25°C , 35°C , 45°C , 60°C , 75°C , 改变泵浦能量, 测出每一温度时, 不同泵浦能量对应的输出能量。实验结果见图 5。图中得到了在每一恒定温度下输入-输出能量间的关系。

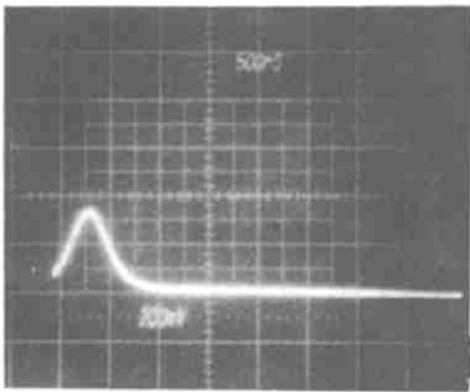


Fig. 4 Wave-shape of the output laser

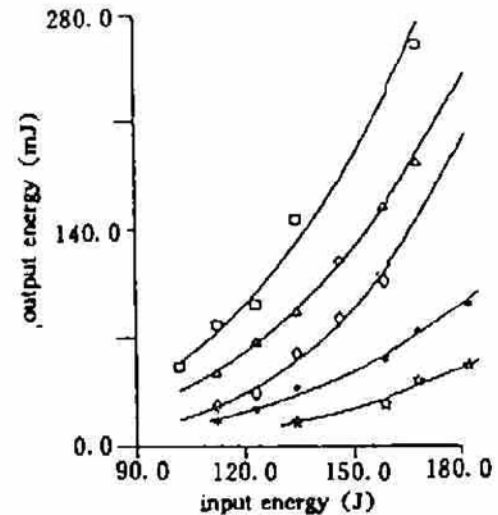


Fig. 5 The dependence of the output energy on the input energy at different temperatures

□, $T = 75^\circ\text{C}$, △, $T = 60^\circ\text{C}$, ◇, $T = 45^\circ\text{C}$, *, $T = 35^\circ\text{C}$, ☆, $T = 25^\circ\text{C}$

比较这些曲线, 可以看到, 在某一确定泵浦能量下, 随着棒的循环水温度的升高, 激光输出能量显著增加。而且, 当温度升高时, 激光振荡阈值下降。另外, 曲线的斜率也随温度的升高而变大, 当温度控制在 25°C 和 35°C 之间时, 曲线的上升趋势比较缓慢, 泵浦能量增加时, 输出能量变化不大; 但当温度控制在 45°C 以上时, 曲线斜率明显增大, 随泵浦能量增加,

输出能量急剧上升。可见,紫翠宝石激光系统与温度有密切的关系。由于实验条件所限,温度最高只能达到 95℃。而实验表明,循环水温度在 95℃时,仍有上述变化趋势。因此,从实验及曲线可以预见,温度继续升高时,泵浦效率还将提高。这与理论计算结果是符合的。

由以上的理论分析和实验结果可见,在室温下,受激发射截面相对较低,所以输出激光的能量受到限制。因此,大多数的紫翠宝石激光系统运转都采用去离子水进行恒温控制,水温控制在接近沸点处,从而得到较高的激光增益。也有人采用乙二醇混合剂或者气体恒温得到更高的工作温度。另外 Kuper 等采用传导致冷技术,使紫翠宝石激光器可以运转在 360℃。

受上能级寿命数据的限制^[6],本文仅给出了 117℃(450K)以下的有效发射截面与温度的关系;由于实验条件的限制,也只验证了工作温度在 20℃~90℃间实验与理论的一致性。Steve Guch 等人在 34℃~310℃之间进行了实验研究^[8],在 207℃(480 K)以下,实验结果和本文的理论曲线是一致的;当温度继续升高时,相同泵浦能量下,激光输出能量仍然增加;但是在 225℃以后,相同泵浦能量下,温度升高时,输出能量降低;而且在温度升高的过程中,激光输出的中心波长向长波长方向移动,而在 34℃时的中心波长为 752 nm,而在 310℃时移动到了 792 nm。

作者感谢本所吴光照副研究员提供优质紫翠宝石棒。

参 考 文 献

- [1] J. C. Walling, O. G. Peterson, High gain laser performance in alexandrite. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, QE-16(2): 119~120
- [2] J. C. Walling, H. P. Jenssen, R. C. Morris *et al.*, Broad band tuning of solid state alexandrite lasers. *OSA Meeting*, San Francisco, CA, Oct. 1978
- [3] J. C. Walling, H. P. Jenssen, R. C. Morris *et al.*, Tunable laser performance in $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{2+}$. *Opt. Lett.*, 1979, 4(6): 182~183
- [4] J. C. Walling, D. F. Heller, H. Samelson *et al.*, Tunable alexandrite lasers: Development and performance. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1985, QE-21(10): 1568~1581
- [5] 张守都, 张克敏, $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ 晶体的激光性能实验. *中国激光*, 1983, 11(1): 44~46
- [6] J. C. Walling, O. G. Peterson, H. P. Jenssen *et al.*, Tunable Alexanderite lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, QE-16(12): 1302~1315
- [7] D. E. McCumber, Theory of phonon terminated optical masers. *Phys. Rev.*, 1964, 134: A299~A306
- [8] Steve Guch, Jr., Carl E. Jones, Alexandrite-laser performance at high temperature. *Opt. Lett.*, 1982, 7(12): 608~610

Research on Temperature Characteristics of an Alexandrite Laser

Yang Xiaodong Ouyang Bin Li Chuandong Xu Bing Lin Lihuang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 1 November 1993; revised 9 March 1994)

Abstract The temperature dependence of the alexandrite laser's characteristics is analysed theoretically and verified experimentally. It shows that the gain and pumping efficiency of the alexandrite laser will increase with the rising of temperature, while the laser threshold decreases.

Key words alexandrite laser, effective emission cross section, temperature characteristics.