

文章编号: 1000-324X(2005)03-0513-09

## 2 $\mu$ m 波段激光晶体研究进展

陆燕玲, 王 俊, 孙宝德

(上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 综述了以 Ho、Tm、Er 为激活离子、以 YAG、YAP 及 YLF 为基质的 2 $\mu$ m 波段激光晶体的特点及应用背景, 详细讨论了几种重要 2 $\mu$ m 波段激光晶体的能级结构、光谱特性及器件研究进展, 指出了适合 LD 泵浦是今后 2 $\mu$ m 波段激光晶体的发展方向。

**关 键 词:** 2 $\mu$ m 波段激光晶体; 能级结构; 光谱特性; LD 泵浦

**中图分类号:** O78 **文献标识码:** A

### 1 引言

自 1960 年梅曼用红宝石晶体作为工作物质发明了第一台激光器以来, 激光晶体已发展到 230 多种, 其中有实用价值的有数 10 种。目前激光晶体探索主要集中在以下四个方面: 宽波段连续可调谐晶体、高功率或超高功率晶体、自激发自倍频晶体和掺钬 (Ho) 的晶体。其中掺 Ho 的晶体实际上包括了能输出 2 $\mu$ m 波段的激光晶体, 它们是掺 Ho、掺铥 (Tm) 和掺铒 (Er) 的晶体。由此可见把掺 Ho 晶体归入本世纪值得开发研究工作之一, 足以说明 2 $\mu$ m 波段激光晶体重要性。

Johnson L.F.<sup>[1]</sup> 首先在 1962 年报道了掺 Ho 钨酸钙 (Ho: CaWO<sub>4</sub>) 晶体实现 2 $\mu$ m 波段的激光输出。图 1 为水分子对不同波长光波的吸收曲线。

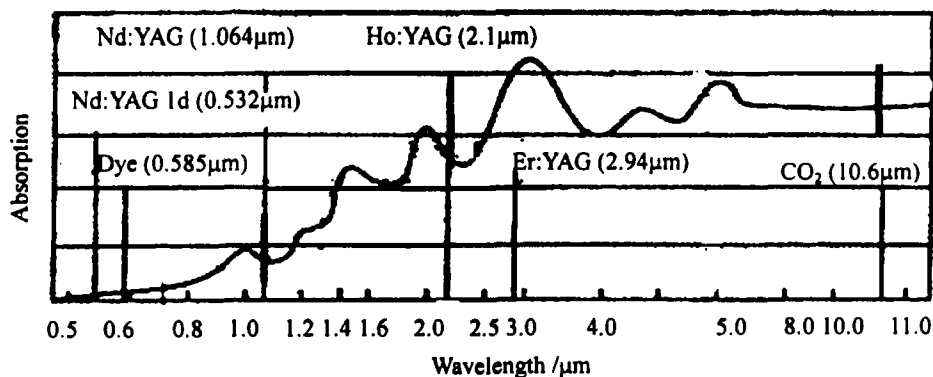


图 1 水分子对不同波长光波的吸收曲线

Fig. 1 Absorption of water molecule on different wavelength light

由该吸收曲线可知, 水分子对 2 $\mu$ m 波段的光波有较强的吸收, 这使得 2 $\mu$ m 波段激光可在下述诸方面得到重要应用: ①激光雷达发射机。用这种雷达探测地面目标时分辨率可提

收稿日期: 2004-05-20, 收到修改稿日期: 2004-06-22

作者简介: 陆燕玲 (1978-), 女, 博士研究生。E-mail: luyanling2002@sjtu.edu.cn

高 8~10 倍. 此外,  $2\mu\text{m}$  波段激光的大气传输特性好, 对战场烟雾穿透能力强, 保密性好, 对人眼也极为安全, 实现激光二极管 (LD) 泵浦可小型化, 因此这种激光器在军事上有重要的应用前景; ② 医用手术刀.  $2\mu\text{m}$  波段激光的范围为  $1.87\sim 2.16\mu\text{m}$ , 它覆盖了水分子和  $\text{CO}_2$  分子的吸收带, 特别是液态水的  $1.94\mu\text{m}$  的强吸收带, 这使得  $2\mu\text{m}$  波段激光很容易被生物组织吸收, 用它可做浅表性手术, 不会伤及深层肌体, 确保手术安全. 它又可通过光纤传输, 与内窥镜配合可用作众多医学学科的手术刀; ③ 环境保护. 用激光差分仪可测量大气中的水蒸气和  $\text{CO}_2$  的含量, 用相干多普勒雷达测量风切变和风速.

因此, 从 20 世纪 60 年代开始, 人们就围绕如何提高  $2\mu\text{m}$  波段激光器的输出功率及效率从材料到器件进行多方位的探索研究, 特别是大功率半导体激光器出现后, 促使人们以激光二极管为泵浦源在提供高效、小型化及性能稳定的  $2\mu\text{m}$  波段激光器上进行更深层次的研究开发. 本文综合介绍了几种常用的  $2\mu\text{m}$  波段激光晶体及其器件的研究进展.

## 2 几种重要的 $2\mu\text{m}$ 波段激光晶体

### 2.1 Ho: YAG 晶体

在红宝石晶体实现激光输出以后, 人们开始发掘新的激光基质晶体. 钇铝石榴石 ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , YAG) 晶体是继钨酸钙之后人们在探索新晶体中至今所获得的综合性能最优良的激光基质晶体, 掺 Ho 石榴石晶体 (Ho: YAG) 自然就成为人们为获得优良的  $2\mu\text{m}$  波段激光输出所要研究的对象.

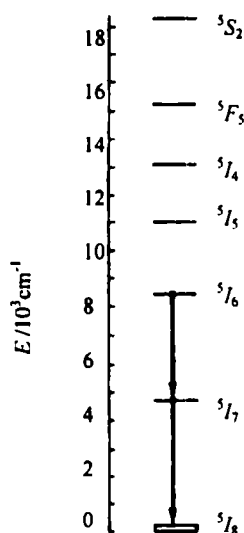


图 2  $\text{Ho}^{3+}$  的能级结构

Fig. 2 Energy structure of  $\text{Ho}^{3+}$  ion in YAG

图 2 为 Ho 离子的能级结构图. 图 3 为 Ho: YAG 在  $500\sim 1000\text{nm}$  范围的透过光谱. 其主要吸收峰为  $\sim 540$  和  $\sim 640\text{nm}$ , 它们分别对应于  $^5I_8$  与  $^5S_2$  和  $^5F_5$  能态间的电子跃迁. 在存在几个亚稳态的能级系统中主要的受激跃迁发生在能级最低的亚稳态和基态之间<sup>[2]</sup>. Ho 离子主要的受激跃迁是亚稳态  $^5I_7$  向基态  $^5I_8$  的分裂能级 ( $518\text{cm}^{-1}$ ) 的跃迁, 是准三能级系统. 人们最初用氙灯或钨灯作泵浦源来泵浦 Ho: YAG, 实现  $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$  的受激跃迁, 输出波长为  $2.094\mu\text{m}$ . 图 4 为氙灯的发射光谱, 与 Ho: YAG 的吸收光谱对照, Ho 离子在可见光范围内的吸收带是窄带吸收, 不能充分利用氙灯可见光范围的宽带发射特性. 因此, 早期的 Ho: YAG 激光器要求在低温 ( $77\text{K}$ ) 下运转, 是高阈值和低效率的<sup>[3]</sup>. 另外, 从 Ho 离子的能级结构分析, Ho 离子缺少可与常用大功率激光二极管输出波长相匹配的泵浦吸收带. 所以, Ho: YAG 激光的实际应用存在困难.

然而, Ho 离子有自己的特点: ① Ho 离子的受激发射截面约是 Tm 离子的 5 倍 ( $9 \times 10^{-21}\text{cm}^2 / 2 \times 10^{-21}\text{cm}^2 \approx 5$ ), 是 Nd 离子的 20 倍; 荧光寿命长 ( $8\text{ms}$ ), 有利于储能, 有希望实现高效的 Q 开关运转; ② 在短脉冲运转时要比 Tm 离子不易引起材料的破坏; ③ Ho 离子输出的激光波长  $2.09\mu\text{m}$  的大气透过性能比 Tm 离子输出的激光波长  $2.01\mu\text{m}$  更优越<sup>[4]</sup>. 所以, 人们对 Ho 离子激光仍有较大兴趣, 并采用不同的技术途径来发展 Ho 离子激光: ① 采用敏化技术来提高转换效率和室温运转. Johnson L.F.<sup>[5]</sup> 在理论上研究了 Er, Ho: YAG 与 Er, Tm: YAG 的能量转移机制, 并实现了光泵 Er, Tm: YAG 和 Er, Ho: YAG 激光器的液氮

(77K) 低温运转, 输出  $2.01\sim 2.09\mu\text{m}$  激光. 以后发展了一些有实用价值的敏化 Ho 离子的晶体, 如光泵室温运转的 Cr, Ho: YAG 激光器和 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器以及激光二极管泵浦

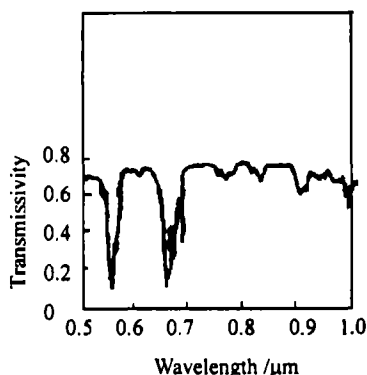


图 3 Ho:YAG 晶体的透过率

Fig. 3 Transmittance of Ho:YAG

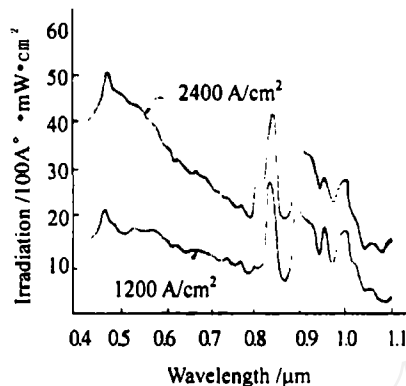


图 4 氙灯发射光谱

Fig. 4 Emission spectra of Xe light

室温运转的 Tm, Ho: YAG 和 Tm, Ho: YLF 激光器等, 一般所说的 Ho 离子激光, 多指含有敏化离子的 Ho 离子激光. 我们将在下面对其重要的材料做出介绍. ②采用  $1.9\mu\text{m}$  波长的激光直接泵浦 Ho 离子, 实现  $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$  的跃迁. Bolling C<sup>[4]</sup> 用激光二极管泵浦 Tm: YAG 晶体产生的激光在腔内泵浦 Ho: YAG, 实现功率为 2.1W 的  $2.097\mu\text{m}$  激光输出; 文献 [6,7] 用激光二极管泵浦 Tm: YLF 产生的  $1.9\mu\text{m}$  激光泵浦 Ho: YAG 实现 Q 开关运转, 获得  $2.09\mu\text{m}$  激光输出, 重复频率为 10Hz, 平均功率为 9.5W, 能量  $>50\text{mJ}$ . 以此 Ho: YAG 激光泵浦  $\text{ZnGeP}_2$  实现光学参量振荡, 得到  $>4.2\text{W}$  中近红外 ( $3.8$  和  $4.65\mu\text{m}$ ) 和  $>2.1\text{W}$  的  $3.5\mu\text{m}$  波长输出. 他们认为这种直接泵浦与 Tm、Ho 敏化系统相比量子缺陷低, 不用敏化离子减少了上转换损耗, 提高了  $2\mu\text{m}$  波段短脉冲激光的效率, 降低了增益对温度的灵敏度. 这些优点的综合效应可使 Ho 离子  $2\mu\text{m}$  波段激光实现高功率和大能量输出.

## 2.2 Cr, Tm, Ho: YAG 晶体

20 世纪 80 年代中期以前最好的 Ho 离子激光是 Johnson L.F.<sup>[3]</sup> 获得的 Er、Tm 和 Cr 分别作为敏化离子的 Ho: YAG 激光. 但是它们都要求在液氮温度 (77K) 运转, 阈值高, 给实际应用带来困难. Antipenko B.M.<sup>[8]</sup> 提出 Cr、Tm、Ho 三掺杂 YAG 晶体, 用氙灯泵浦, 在室温实现低阈值  $2.12\mu\text{m}$  的激光输出.

图 5 为 Cr, Tm, Ho: YAG 晶体 Cr $\rightarrow$ Tm $\rightarrow$ Ho 能量转移图. 氙灯可见光部分被  $\text{Cr}^{3+}$  的宽带吸收, 使其从基态  $^4A_2$  跃迁到  $^4T_1$  和  $^4T_2$  能态, 然后经无辐射跃迁弛豫到  $^2E$  和  $^4T_2$  能态, 对  $\text{Cr}^{3+}$  而言  $^2E$  能态到基态跃迁是禁戒的, 而  $\text{Cr}^{3+}$  的  $^2E$  能态与  $\text{Tm}^{3+}$  的  $^3F_3$  能态相近, 二者易发生共振转移, 能量通过偶极子相互作用, 从  $\text{Cr}^{3+}$  的  $^2E$  和  $^4T_1$  能态转移到  $\text{Tm}^{3+}$ , 使处于基态的  $\text{Tm}^{3+}$  跃迁到激发态  $^3F_3$  和  $^3H_4$ , 处于  $^3F_3$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$  再经无辐射跃迁弛豫到  $^3H_4$  能态. 此时, 一个处于  $^3H_4$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$  除了经无辐射跃迁至  $^3F_4$  亚稳态外, 它还能与处于基态的  $\text{Tm}^{3+}$  发生交叉弛豫产生另一个处于  $^3F_4$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$ , 而

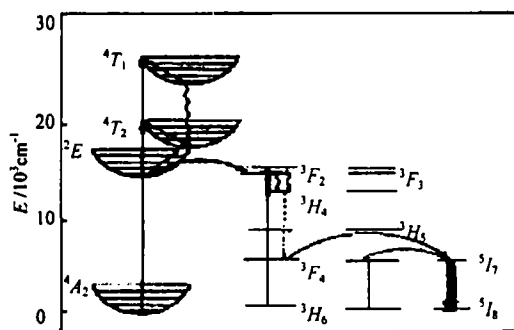


图 5 Cr, Tm, Ho:YAG 晶体 Cr $\rightarrow$ Tm $\rightarrow$ Ho 能量转移图

Fig. 5 Excitation-transfer process in Cr, Tm, Ho: YAG crystal

一个处于  $^3H_4$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$  除了经无辐射跃迁至  $^3F_4$  亚稳态外, 它还能与处于基态的  $\text{Tm}^{3+}$  发生交叉弛豫产生另一个处于  $^3F_4$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$ , 而

这些处于  $^3F_4$  能态的  $\text{Tm}^{3+}$  通过共振转移把能量转移到  $\text{Ho}^{3+}$ , 使处于基态  $^5I_8$  的  $\text{Ho}^{3+}$  受激跃迁到激光上能级  $^5I_7$  能态, 然后, 处于  $^5I_7$  能态的  $\text{Ho}^{3+}$  受激跃迁到基态  $^5I_8$  产生  $2.1\mu\text{m}$  激光。

由于光泵 Cr, Tm, Ho: YAG 可以达到高脉冲能量输出的目的, 人们对改进 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器的兴趣始终不止<sup>[9,10]</sup>. 到上世纪 90 年代, 灯泵 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器已经商品化, 并且在多种医学学科得到临床应用, 是  $\text{Ho}^{3+}$  激光得到实际应用最多的一种激光. Zendzian<sup>[11]</sup> 报道灯泵 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器平均输出功率为 17W, 斜率效率 2%, 这是目前灯泵 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器最高的输出水平。

### 2.3 Tm: YAG 晶体

1965 年 Johnson L.F<sup>[3]</sup> 用氙灯和钨灯分别实现 Tm: YAG 晶体低温 (77K)  $2.01\mu\text{m}$  的脉冲和连续波的输出, 使人们认识到 Tm 离子是能实现  $2\mu\text{m}$  波长激光输出的另一个稀土离子, 但当时光泵阈值高 (脉冲: 200J, 连续 300W), 又要在低温运转, 很难有实用价值, 又由于 Tm 离子的受激发射截面是 Ho 离子的 1/5, 使人们对它是否能实现高效的  $2\mu\text{m}$  激光输出存有疑虑, 并没有很看重它的发展前景. 但是 Tm 离子量子效率接近 2 的发光过程被认为可以用来抵消发射截面较小的不利面, 可以有效地向 Ho 离子转移能量。

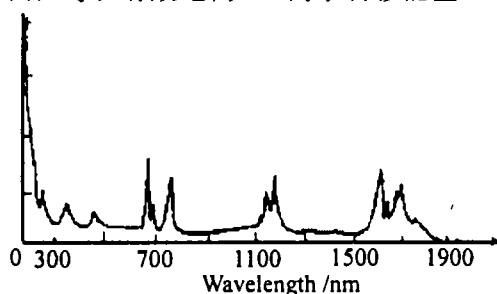


图 6 室温下 Tm: YAG 的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectrum of Tm:YAG at room temperature

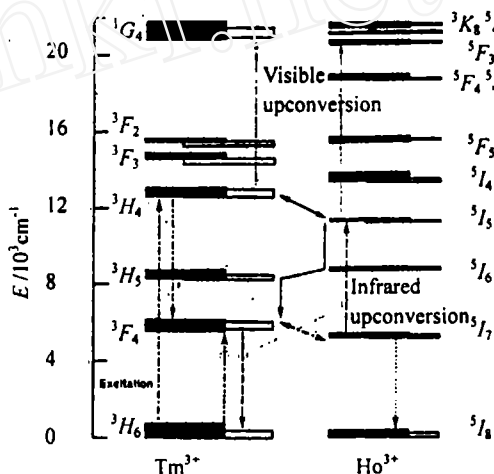


图 7 Tm、Ho 在 YAG(■) 和 YLF(□) 基质中的能级

Fig. 7 Energy structure of Tm and Ho in YAG and YLF

图 6 为 Tm: YAG 的吸收光谱. 图 7 为 Tm、Ho 在 YAG 和 YLF 基质晶体中的能级图. 由吸收光谱可知, Tm: YAG 晶体在可见和近红外区的吸收都是窄带吸收, 以 682 和 785nm 二吸收带最强. 682nm 吸收带对应于能级图上从基态  $^3H_6$  到激发态  $^3F_3$  的跃迁, 785nm 吸收带对应于  $^3H_6$  到激发态  $^3H_4$  的跃迁. 处于  $^3F_3$  能态的 Tm 离子可经无辐射跃迁弛豫到  $^3H_4$  能态.  $^3F_4$  是亚稳态, 是产生 Tm 激光的上能级, 造成  $^3F_4$  能态 Tm 离子数反转是通过 ①  $^3H_4$  能态 Tm 离子自猝灭过程弛豫到  $^3F_4$  能态; ② 上述自猝灭发射的光子把基态 Tm 离子交叉弛豫到  $^3F_4$  能态实现的. 这两点形成了 Tm 离子特有的量子效率接近 2 的发光过程, 称为“two for one”过程, 这一过程依赖于 Tm 离子浓度. 当上述具有  $^3F_4$  能态的 Tm 离子数反转时, 受激跃迁发射范围为  $1.87\sim 2.19\mu\text{m}$  的可调谐激光. Tm 离子激光的终态能级是基态分裂能级 ( $588\text{cm}^{-1}$ ), 离基态很近, 是准三能级系统。

但是,  $2\mu\text{m}$  波段激光潜在的应用价值, 促使人们没有放弃对 Tm: YAG 激光的研究。

Stoneman R.C.<sup>[12]</sup> 用钛宝石激光泵浦 Tm: YAG 首先获得连续可调谐激光输出后, 人们看到 Tm: YAG 在 785nm 的强吸收与大功率激光二极管发射波长相匹配的特点会产生巨大的应用价值, 开始对 Tm: YAG 晶体的激光性能开展广泛的研究. Eric、Honea<sup>[13]</sup> 报道用 6 个 InAlGaAs 激光二极管阵列 (460W) 作为泵浦源, 采用特殊的激光腔设计, 用 Tm(2~4at%): YAG 作为增益介质实现  $2.01\mu\text{m}$  波长的 115W 连续输出, 这是迄今 Tm: YAG 输出的最大功率. 文献 [12] 也报道了连续可调谐激光在  $1.87\sim 2.16\mu\text{m}$  的 150nm 可调谐范围内激光器的斜率效率 >30%, 最大可达 59%; 在连续 Q 开关 Tm: YAG 激光器研究方面, Ruosad G. 报道用 2 个 60W 激光二极管侧向泵浦 Tm(2~4at%): YAG, 实现  $2.01\mu\text{m}$  波长输出, 单光脉冲输出的能量在 10mJ 以上, 阈值在 100mJ 以下. 在提供高质量 Tm: YAG 激光器研究方面, Galzerans G.<sup>[14]</sup> 在 2001 年报道用光纤耦合的 GaAlAs 激光二极管为泵浦源 (3W) 泵浦 Tm(9.3at%): YAG, 得到单纵模 70mW 的输出, 这种激光器在高分辨率光谱仪、度量学和高灵敏光学传感器中有很好的应用背景.

目前 Tm: YAG 激光器的研究主要是采用激光二极管作泵浦源, 所用的晶体长度在 10mm 以下, 直径  $\phi 4\sim 5\text{mm}$ , 所以晶体的光学质量对器件性能的影响并不是占主要地位, 而 Tm 离子的掺杂浓度及 Tm 离子能级结构引起的上转换损耗 (如图 7 中所标出的  $^3\text{H}_4 \rightarrow ^1\text{G}_4$  上转换) 会对器件的斜率效率、阈值产生影响: Tm(12at%): YAG 的斜率效率是 Tm(3at%): YAG 的一半, 阈值改变不明显, 只略有增加; 器件的增益系数  $\geq 3\%\text{cm}^{-1}$  时, 就要考虑上转换损耗的影响. 由于 Tm: YAG 的激光系统是准三能级系统, 器件运转时的温度会对器件的斜率效率和阈值产生影响, 室温的阈值是  $-10^\circ\text{C}$  的 2 倍, 斜率效率是  $-10^\circ\text{C}$  的一半.

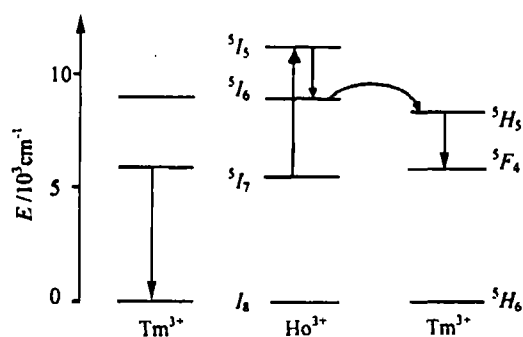


图 8 Tm, Ho: YAG 晶体中的上转换损耗

Fig. 8 Up conversion loss in Tm, Ho: YAG crystal

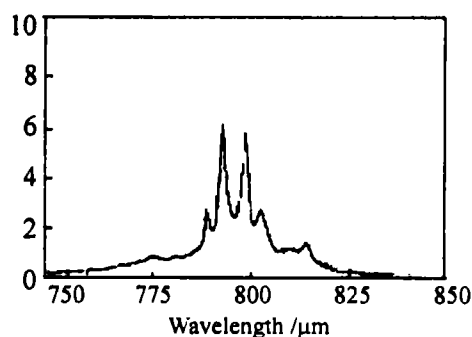


图 9 Tm:YAP 的吸收谱

Fig. 9 Absorption spectrum of Tm:YAP

人们最先是从 Ho 离子得到  $2\mu\text{m}$  波段激光, 然而 Tm 离子 785nm 的强烈吸收带以及对 Ho 离子实现能量转移等特性, 使得最初对 Ho 离子激光的研究注意力集中在对 Tm, Ho: YAG 晶体的研究上. 图 7 也标出了 Tm 离子对 Ho 离子能量转移的过程, 与在 Cr, Tm, Ho: YAG 中 Tm 向 Ho 转移能量过程一致. 按这一理想的能量转移过程或许能使 Tm, Ho: YAG 成为提供高转换效率的  $2\mu\text{m}$  波段激光器.

图 8 是 Tm, Ho: YAG 晶体中的上转换损耗示意图. 处于  $^5\text{I}_7$  能态的 Ho 离子受激跃迁到  $^5\text{I}_5$  能态, 实际上减少了 Ho 离子亚稳态寿命, 影响了它的储能, 从而影响了 Ho 离子 Q 开关运转的性能. 在低重复频率 Q 开关时 Tm 离子的寿命为 4ms, 而 Ho 为 1ms, 所以 Tm: YAG 晶体是明显有利的; Tm: YAG 对温度的灵敏度要小于 Tm, Ho: YAG. 所以, 激光二极管作为泵浦源实现高平均功率、低阈值  $2\mu\text{m}$  波段激光应以发展 Tm: YAG 为主. 但我们也应注意到 Ho 离子的激光输出为  $2.09\mu\text{m}$ , 与 Tm 离子输出的  $2.01\mu\text{m}$  稍有差别, 如果在实际应用

中由于这一差别会受影响时, 我们仍应采用 Tm 敏化 Ho 的技术, 此时应该选择上转换损耗小的材料为基质 (声子能低的材料)。

#### 2.4 Tm: YAP 晶体

钇铝石榴石 (YAG) 是一种优良的激光基质晶体, 具有立方晶系的结构. 而具有立方晶系结构的晶体在承受高功率激光运转时对泵浦光辐射的吸收引起的热致双折射会导致退偏振损耗, 影响了最终激光输出功率或能量, 这是 YAG 基质晶体的一个重要的缺陷. 铝酸钇晶体 ( $\text{YAlO}_3$ 、YAP) 是  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  系统中的另一个化合物, 具有正交晶系结构, 它所具有的双折射特性可以抑制热致双折射. 材料结构上的各向异性使其受激发射截面也是各向异性, 致使不同取向的掺杂 YAP 晶体具有不同的激光功能、输出波长及运转形式,  $b$  轴取向的晶体具有高增益特性、适宜作连续运转激光器的工作物质. 此外, Tm: YAP 晶体的受激发射截面是 Tm: YAG 的 2 倍<sup>[15,16]</sup>. 因此, Tm: YAP 是一种有特色的能输出  $2\mu\text{m}$  波段激光的晶体.

表 1 Tm: YAP、Tm: YAG、Tm, Ho: YAP 和 Tm, Ho: YLF 晶体  $2\mu\text{m}$  波段激光特性  
Table 1 Laser performance of Tm: YAP, Tm: YAG, Tm, Ho: YAP and Tm, Ho: YLF crystals

$2\mu\text{m}$ waveband laser crystal	Output coupler transmission /%	Threshold pump intensity / $\text{kW}\cdot\text{cm}^2$	Max. output power / $\text{mW}$	Slope efficiency /%	Optical-to- optical conversion efficiency/%	Conversion efficiency /%	Peak wave- length / $\mu\text{m}$
2mmTm(4.2at%):YAP	1.4~1.8	8.9	730	40.3	24	42	1.965- 2.020
2mmTm(6.0at%):YAG	1.8	9.5	254	25.6	8.5	21.2	2.016
3mmTm(4.2at%) Ho(0.28at%):YAP	2.1	9.2	270	19.3	9	14	2.12
4mmTm(6.0at%) Ho(0.4at%):YLF	1.6	10.5	660	38.9	22	30	2.066

图 9 为 Tm(4.2at%): YAP 晶体泵浦带吸收光谱, 大功率 GaAs/AlGaAs 激光二极管输出的 792~795nm 波长的激光可以作为 Tm: YAP 晶体的泵浦源. Tm: YAP 可以与 Tm: YAG 类同的发光机制实现 1.965~2.020 $\mu\text{m}$  的激光输出.  $\text{Ho}^{3+}$  双掺的 Tm, Ho: YAP 可以与 Tm, Ho: YAG 类同的能量转换方式实现  $\text{Ho}^{3+}2.120\mu\text{m}$  的激光输出. Elder I.F.<sup>[15,16]</sup> 对 Tm: YAP、Tm: YAG、Tm, Ho: YAP 和 Tm, Ho: YLF 的  $2\mu\text{m}$  波段激光输出特性作了研究和比较, 其结果列于表 1.

比较表 1 中各项基质数据, Tm: YAP 的性能优于 Tm: YAG, 其转换效率是 Tm: YAG 的 2 倍. 此外, Tm: YAP 的双折射性使输出的激光具有线偏振特性, 而 Tm: YAG 的输出激光不具线偏振特性, 易发生热致双折射引起的退偏振损耗. Tm: YAP 的输出功率不易饱和, 而且其  $\text{Tm}^{3+}$  的寿命不随泵浦强度而变化, 说明 Tm 在 YAG 中的上转换速率大于在 YAP 中的上转换速率. 因此, Tm: YAP 是一个值得作深入研究的  $2\mu\text{m}$  波段激光晶体.

#### 2.5 Tm, Ho: YLF 晶体

具有白钨矿结构的 Nd:  $\text{CaWO}_4$  晶体是最早实现室温连续激光输出的晶体, 而氟化钪锂 ( $\text{LiYF}_4$ , YLF) 晶体是自钨酸钙晶体以后, 至今从白钨矿结构晶体材料中筛选出来的很有用

的激光基质晶体. 它具有四方晶系结构, 三价稀土离子可取代  $\text{Y}^{3+}$  格位, 而无需电荷补偿. 所以很多稀土离子掺入后都实现了偏振激光的输出. 应该注意到  $\text{Tm}:\text{YLF}$  的主要荧光谱线是  $1.9\mu\text{m}$ , 所以在讨论  $2\mu\text{m}$  波段 YLF 晶体时只包括  $\text{Ho}:\text{YLF}$  和  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$ . YLF 晶体中  $\text{Tm}^{3+}$  向  $\text{Ho}^{3+}$  的能量转移类同  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YAG}$  和  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YAP}$ .

Chickles E.P.<sup>[17,18]</sup> 等人在早期研究  $\text{Ho}:\text{YLF}$  激光性能时实现了  $2.069\mu\text{m}$  的激光输出, 并指出 YLF 作为基质晶体对紫外线辐射的抗损伤能力强于 YAG,  $\text{Ho}:\text{YLF}$  的激光上能级寿命长 (12ms,  $\text{Ho}:\text{YAG}$  为 3.5ms), 有利于储能及实现 Q 开关运转, 并可以在 Tm 和 Ho 离子间实现有效的能量转移来降低阈值和提高效率.

早期一般用氙灯泵浦  $\text{Ho}:\text{YLF}$  和  $\text{Er}, \text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  在低温运转实现激光输出. 到 20 世纪 90 年代, 利用 Tm 离子对 785nm 波长强烈吸收的特点, 研究的重点是大功率激光二极管泵浦  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  的激光特性. 因为 YLF 是低声子能基质<sup>[14]</sup>, 使  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  不像  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YAG}$  那样易发生上转换损耗. Yu Jirong<sup>[19]</sup> 用输出波长 792nm 的 10 个 GaAlAs 激光二极管阵列作为泵浦源 (每个激光二极管的峰值功率为 360W), 泵浦长度为 20mm 的  $\text{Tm}(6\text{at}\%), \text{Ho}(0.4\text{at}\%):\text{YLF}$  晶体, 得到 Q 开关输出能量为 600mJ, 重复频率为 6Hz, 脉宽 170ns, 整体激光转换效率为 61%, 是迄今得到的单个脉冲输出的最大能量.

微片激光器是形成便携式激光器 and 高质量单纵模振荡器的重要候选者, 因为这种共振腔长度很短 (1mm), 使荧光谱线中只有几个模式发出振荡.  $\text{Nd}:\text{YAG}$  和  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体的荧光谱线非常窄, 所以常从这二种材料的微片激光器获得单纵模振荡, 但谱线是  $1.064\mu\text{m}$ .  $\text{Ho}^{3+}$  和  $\text{Tm}^{3+}$  在 YLF 中的荧光谱线比  $\text{Nd}:\text{YAG}$  和  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  要宽很多, 在阈值之上不易产生单纵模振荡, 只能得到几个 mW 的输出. 经过近几年的努力,  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  晶体微片激光器的输出功率已获得较大提高. Elder I.F.<sup>[20]</sup> 用 3W 激光二极管泵浦  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  微片得到 300mW 单频输出, 波长为  $2.065\mu\text{m}$ , 束宽 3nm. Jun Izawa<sup>[21]</sup> 用 1W 785nm 激光二极管经光纤耦合, 比较了单腔和双腔的性能, 用双腔实现了  $2.06\mu\text{m}$  30mW 单纵模输出, 单腔只有 7mW 输出, 这表明双腔是获得稳定的单纵模振荡的有效方法. 所以, 用  $\text{Tm}, \text{Ho}:\text{YLF}$  作为工作物质也可能提供有实用价值、波长为  $2.06\mu\text{m}$  的微片激光器.

## 2.6 Er: YAG晶体

$\text{Er}:\text{YAG}$  中  $\text{Er}^{3+}$  作为激活离子掺入 YAG 晶格中处于氧十二面体中  $\text{Y}^{3+}$  的格位.  $\text{Er}^{3+}$  的离子半径为 0.100nm, 而  $\text{Y}^{3+}$  的离子半径为 0.101nm, 所以  $\text{Er}^{3+}$  取代  $\text{Y}^{3+}$  并不会引起 YAG 晶格的畸变, 甚至可以 100% 的取代成  $\text{Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , 称为铒石榴石. 图 10 为  $\text{Er}:\text{YAG}$  中  $\text{Er}^{3+}$  离子的能级简图.

$\text{Er}^{3+}$  离子受激跃迁可产生 1.64、1.77 和  $2.94\mu\text{m}$  三个波长的激光, 其中  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  受激跃迁产生  $2.94\mu\text{m}$  的激光. 由于  ${}^4I_{11/2}$  能态的寿命仅为  $100\mu\text{s}$ , 比  ${}^4I_{13/2}$  能态的寿命 (2ms) 短很多, 这使达到粒子数反转过程稍为复杂, 一般不能作 CW 运转, 只能以一定重复率的脉冲方式运转.  $2.94\mu\text{m}$  激光被水强烈吸收而在生物和医学上有很大的应用前景.

图 11 为  $\text{Er}:\text{YAG}$  从 400~1900nm 的吸收光谱. 由该吸收光谱可知  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  的吸收跃迁的谱线很窄, 且吸收系数小, 故用 800nm 激光二极管泵浦的效率低. 因此, 通常  $\text{Er}:\text{YAG}$  激光器是用氙灯或钛宝石激光器作为泵浦源.

由于  $\text{Er}^{3+}$  可以以任意的比例掺入到 YAG 晶体中, 因此  $\text{Er}^{3+}$  的掺入浓度会对  $\text{Er}:\text{YAG}$  激光性能产生一定的影响. 沈国土等人<sup>[22]</sup> 在研究了不同  $\text{Er}^{3+}$  浓度对  $\text{Er}:\text{YAG}$  晶体发光光谱的影响时指出,  $\text{Er}^{3+}$  浓度为 50wt% 时对  $1.64\mu\text{m}$  波长有吸收现象. 王庆元<sup>[23]</sup> 经理论计算认为  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  和  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$  跃迁的能量十分接近, 可以发生能量的共振转移.

而自吸收和能级间的交叉弛豫过程可以使能量共振转移得到加强. 当  $\text{Er}^{3+}$  浓度增加时, 自吸收过程和交叉弛豫加速了  $^4I_{13/2}$  能态粒子数的淬灭, 使  $\text{Er}^{3+}$  的  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  受激跃迁成为一个四能级系统. 所以当  $\text{Er}^{3+}$  浓度为 50wt% 时 Er: YAG 晶体容易实现  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  的  $2.94\mu\text{m}$  激光输出, 而浓度低时容易实现  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  的  $1.64\mu\text{m}$  激光输出.

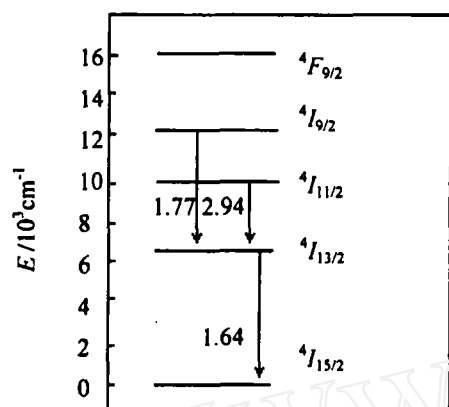


图 10 YAG 中  $\text{Er}^{3+}$  离子的能级结构图

Fig. 10 Energy structure of  $\text{Er}^{3+}$  ion in YAG

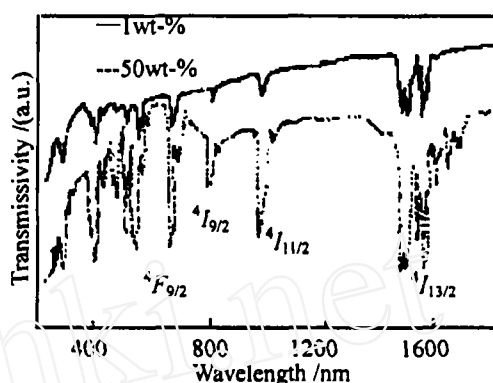


图 11 Er:YAG 晶体的吸收谱

Fig. 11 Transmission spectra of Er:YAG

Er: YAG 激光目前以在医学领域的应用为主. 市场上出现的 1J 5Hz 5W Er: YAG 激光器已足够用于整容术, 牙科市场需求的产品为 1J 15W, 重复频率为 30 Hz, 用于眼科的 Er: YAG 激光器要求重复频率高达 200Hz, 能量却要求不高 (0.6~3mJ), 这种激光器可作眼科中的精巧手术, 快速不至于造成其他肌体组织的损伤. 目前最高输出的平均功率为 30W, 重复频率高达 300Hz. 然而, Er: YAG 激光不能用石英光纤传输, 只能用氟化锆光纤传输, 这限制了它在医学外科手术上的广泛应用.

### 3 小结

本文从光谱特征和能级结构分析指出: ①  $2\mu\text{m}$  波段激光晶体一般是准三能级激光系统, 在可见光区是窄带吸收, 用氙灯或钨灯泵浦源只能实现低温运转, 阈值高, 效率低. 由于 Tm 离子在 785nm 处有强吸收, 因此采用与此波长相匹配的大功率激光二极管作为泵浦源来获取大功率室温高效激光运转、性能稳定及小型化的器件将成为  $2\mu\text{m}$  波段激光器发展的主要方向; ②采用敏化技术可以提高光泵  $2\mu\text{m}$  波段激光器的效率, 有助于实现 Ho 离子激光波长的输出. 由于 Tm, Ho: YAG 晶体存在严重的能量上转换损耗, 所以在 Tm, Ho: YAG 晶体和 Tm: YAG 晶体间应以发展 Tm: YAG 晶体为主. 由于 YLF 晶体是一个低声子能材料, Tm, Ho: YLF 晶体中能量上转换损耗小于 Tm, Ho: YAG, 所以在这两者之间应以发展 Tm, Ho: YLF 晶体为主; ③以  $1.9\mu\text{m}$  的大功率半导体激光二极管直接泵浦 Ho 离子是实现高功率、大能量  $2\mu\text{m}$  波段激光输出的另一重要途径; ④ Tm: YAP 晶体具有各向异性的特点, 能输出线偏振激光. 初步研究表明它的激光特性优于 Tm: YAG 晶体, 激光转换效率是 Tm: YAG 晶体的 2 倍, 是一个值得进一步研究的  $2\mu\text{m}$  波段激光晶体; ⑤ Er 离子的吸收带很窄且吸收系数小决定了它只能以光泵作为泵浦源, 应向高功率、高重复频率方向发展.

$2\mu\text{m}$  波段激光在医疗卫生和现代军事技术上都有重要的应用背景. LD 泵浦是当今固体激光器的发展趋势, LD 泵浦的固体激光器要求激光材料高储能, 即掺杂浓度高、荧光寿



命长、晶体体积小、吸收波长宽、泵浦效率高、光学质量好, 这也是今后  $2\mu\text{m}$  波段激光晶体的发展方向。

## 参考文献

- [1] Johnson L F, et al. *Proc. IRE*, 1962, **50**: 87.
- [2] Kaminskii A A. *Laser Crystals Their Physics and Properties*. Berlin Heidelberg New York, 1981.
- [3] Johnson L F, Geusic J E, Van Uitert L G. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**(5): 127-129.
- [4] Bolling C, Hayward R A, Clarkson W A, et al. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(22): 1757-1759.
- [5] Johnson L F, et al. *Physics Review*, 1964, **133**: A494.
- [6] Budni P A, Ibach C R, Setzler S D, et al. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12): 1016-1018.
- [7] Hitz Breck. *Photonics Spectra*, 2003, **37**(8): 29-30.
- [8] Antipenko B M, et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1985, **11**: 284.
- [9] Imai S, Yamada T, Fujimori Y, et al. *Optics and Laser Technology*, 1990, **22**(5): 351-353.
- [10] Scott A M, Whitney W T, Duiquan M T, et al. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 1994, **11**(10): 2079-2088.
- [11] Zendzian, Jankiewicz, Jabczynski, et al. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1996, **2772**: 17, 28-34.
- [12] Stoneman R C, Esterowitz L. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 486-488.
- [13] Eric C Honen, et al. *IEEE J Quantum Electronics*, 1997, **33**(9): 1592.
- [14] Galzerans G, et al. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**(4): 1003.
- [15] Elder I F, Payne M J P. *Optics Communications*, 1998, **145**: 229-239.
- [16] Elder I F, Payne M J P. *Optics Communications*, 1998, **148**: 265-269.
- [17] Chickles E P, Naiman C S, Folweiler R C. *IEEE J Quantum Electronics*, 1972, **8**(2): 225-230.
- [18] Chickles E P, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**: 119.
- [19] Yu Jirong, et al. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(7): 540-542.
- [20] Elder I F, Payne M. *J. Electronics Letters*, 1998, **34**(3): 284.
- [21] Jun Izawa, Hayato Nakajima, Hiroshi Hara, et al. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15): 2418-2421.
- [22] 沈国土, 郭祥义, 祝生祥, 等 (SHEN Guo-Tu, et al). *人工晶体学报 (Journal of Synthetic Crystals)*, 1994, **23**(1): 62-66.
- [23] 王庆元, 等 (WANG Qing-Yuan, et al). *光学学报 (ACTA OPTICA SINICA)*, 1986, **6**(4): 307-311.

## Research Progress of $2\mu\text{m}$ Waveband Laser Crystals

LU Yan-Ling, WANG Jun, SUN Bao-De

(State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:**  $2\mu\text{m}$  waveband laser crystals in common use are some of host crystals (e.g. YAG, YAP and YLF) doped with Ho, Tm and Er ions. In this paper, a comprehensive dispatch of some  $2\mu\text{m}$  waveband laser crystals on their feature and application background was described. The spectrum characteristics, energy structures of some important  $2\mu\text{m}$  waveband laser crystals were discussed in detail. The latest research progresses on a variety of devices were introduced. Suggestions on the development direction of  $2\mu\text{m}$  waveband laser crystals for LD pumping were made.

**Key words**  $2\mu\text{m}$  waveband laser crystal; energy structure; spectrum characteristic; laser-diode pumping