

文章编号: 1001-3806(2006)03-0286-03

## 多镜腔 1.44 $\mu\text{m}$ 波长 Nd:YAG 激光器的实现

梁志远, 张盛伏, 王建明

(北京光电技术研究所, 北京 100010)

**摘要:** 为了开发在医学应用领域具有独特优点的 1.44 $\mu\text{m}$  激光, 采用 Nd:YAG 激光多镜腔技术, 设计出对不同波长镀膜参量不同的腔镜。通过增加腔镜的方法, 增大了谐振腔对 1.06 $\mu\text{m}$  和 1.32 $\mu\text{m}$  波长的损耗, 同时增大了 1.44 $\mu\text{m}$  波长的增益。解决了两镜腔镀膜难以实现的问题, 有效抑制了 1.06 $\mu\text{m}$  和 1.32 $\mu\text{m}$  波长的振荡。实现了从  ${}^4F_{3/2}$  到  ${}^4I_{5/2}$  的跃迁, 获得了 1.44 $\mu\text{m}$  激光输出。理论分析和实验设计表明, 多镜腔比两镜腔更容易实现 1.44 $\mu\text{m}$  波长的激光输出。

**关键词:** 激光技术; 1.44 $\mu\text{m}$  激光; Nd:YAG; 多镜腔

**中图分类号:** TN242 **文献标识码:** A

### The achievement of multimirror cavity wavelength 1.44 $\mu\text{m}$ Nd:YAG laser

LIANG Zhiyuan, ZHANG Shengfu, Wang Jianming

(Beijing Institute of Optoelectronic Technology, Beijing 100010, China)

**Abstract** In order to exhibit the 1.44 $\mu\text{m}$  laser with unique merits in medical application, the multimirror technology of Nd:YAG laser is adopted. The mirrors with special coating parameters to different wavelength are designed. By the means of adding the mirrors, the loss of 1.06 $\mu\text{m}$ , 1.32 $\mu\text{m}$  as well as the gain parameter of 1.44 $\mu\text{m}$  are increased in resonator. Then the difficult problems of coating requests in two-mirror cavity are solved. The laser oscillation of 1.06 $\mu\text{m}$  and 1.32 $\mu\text{m}$  has been restricted effectually. Eventually, the transition from  ${}^4F_{3/2}$  to  ${}^4I_{5/2}$  levels is realized and the 1.44 $\mu\text{m}$  laser is achieved. Theoretic analysis and experimental design show that 1.44 $\mu\text{m}$  laser oscillates easier in multimirror resonator than in two-mirror resonator.

**Key words** laser technique; 1.44 $\mu\text{m}$  laser; Nd:YAG; multimirror cavity

## 引 言

掺钕的钕铝石榴石激光 (Nd:YAG) 作为固体激光器已非常成熟。它具有阈值低、吸收截面大、荧光量子效率高、波长的温度漂移小、可在常温下工作等特点而广泛应用于材料加工、测量、军工和医疗<sup>[1,2]</sup>。

1.44 $\mu\text{m}$  波长 Nd:YAG 激光在医学应用上有独特的优点。水的吸收率较高, 可有效实现对人体组织的汽化切割。人体组织中含有约 80% 的水, 因此, 水对各种不同波长激光的吸收表征了肌体对激光的吸收特性。不同波长和工作方式的激光可以对人体组织产生不同的物理作用, 实现汽化、切割和凝固作用。不同波长的激光对人体组织的穿透深度不同, 激光穿透组织越深, 作用的范围越大, 汽化切割时损伤的区域也越大。水对 1.44 $\mu\text{m}$  波长的 Nd:YAG 激光的吸收率比 Ho:YAG 激光略高, 能穿透组织仅约 0.4mm<sup>[1]</sup>, 比现有

1.06 $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光浅约两个量级, 也比新应用的 1.32 $\mu\text{m}$  波长的激光高出一个多量级。所以在汽化切割时, 对组织的损伤层很薄, 术后容易愈合。而且它可以通过石英光纤进行传输, 达到既方便操作切割效果又好的要求。相比 Ho:YAG 激光更具有运行成本低等优点。另外, 四能级运转的 1.44 $\mu\text{m}$  波长的 Nd:YAG 激光比三能级运转的 Ho:YAG 激光温度稳定性好, 对冷却系统要求低, 因此, 无论是整机体积、成本还是工作噪声、稳定性, 1.44 $\mu\text{m}$  波长的 Nd:YAG 激光都是非常值得开发利用的新波长医用激光器。

虽然产生 1.44 $\mu\text{m}$  波长 Nd:YAG 激光效率较低, 但是通过光学谐振腔的特殊设计, 有效抑制 1.06 $\mu\text{m}$  和 1.32 $\mu\text{m}$  波长激光的振荡, 可以获得焦耳级的输出, 其能量已可满足激光治疗的需求。

虽然目前国际上对于 1.44 $\mu\text{m}$  波长 Nd:YAG 激光器仅有少量的研究报道<sup>[1-4]</sup>, 但是由于该波长在医学临床应用中所具有的显著优点, 必将促进对 1.44 $\mu\text{m}$  波长 Nd:YAG 激光器更深入的研究和开展实际应用。

## 1 Nd:YAG 的能级系统

Nd:YAG 可以近似地看作较理想的四能级系统,

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (4052013)

作者简介: 梁志远 (1955-), 男, 教授级高级工程师, 现从事医用激光技术研究。

Email: lase@public.bta.net.cn

收稿日期: 2005-04-13 收到修改稿日期: 2005-09-08

其中<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>以上的各能态相对于<sup>4</sup>I能态来说是激发态。这些激发态中处于<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>能态的离子寿命最长,约为200μs,是亚稳态能级。它对应于<sup>4</sup>I的各个能级之间都可以有不同波长的辐射跃迁。根据各激发态的吸收光谱表明在0.75μm和0.81μm为中心的吸收带最强,它们分别对应于<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>+<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>能态和<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>+<sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>能态。在光抽运的激励下,处于基态的大量Nd离子获得能量后就跃迁到上述吸收带的各个能态。但由于这些能态上的离子寿命很短,很快地弛豫到亚稳态<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>上,从而在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>相对于<sup>4</sup>I能态的各能级之间形成粒子数反转,为产生受激辐射振荡放大获得激光输出创造了条件。

迄今为止,<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>到<sup>4</sup>I<sub>1/2</sub>之间的1.06μm激光输出获得了最广泛的应用。<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>到<sup>4</sup>I<sub>3/2</sub>之间的1.32μm激光也开始获得应用。<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>到<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>之间的0.914μm激光由于需要低温下才能运转未能实际使用,<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>到<sup>4</sup>I<sub>5/2</sub>的跃迁就是产生1.44μm波长的激光。

这一波长没有被开发利用的原因是因为该波长粒子的受激发射截面小于1.06μm和1.32μm,因而在谱线竞争中被抑制,不可能产生激光振荡。

## 2 产生 1.44μm 波长激光振荡的条件及三镜腔结构

从钕离子的能级图可以看到,在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>5/2</sub>之间存在1.44μm波长激光跃迁的可能性,由表1可以看到,它的受激辐射截面比1.06μm波长的小25倍,也比1.32μm波长的小5倍,因此在模竞争中不能占据优势,很难形成1.44μm波长的受激辐射得到激光输出<sup>[2]</sup>。因而要产生该波长的激光振荡必须抑制1.06μm和1.32μm波长的激光振荡,这是产生1.44μm波长激光振荡的先决条件。

Table 1 Transition energy level and excitation cross section

transition energy level	λ/μm	σ/10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup>
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>1/2</sub> (R <sub>2</sub> →Y <sub>3</sub> )	1.0641	71
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>3/2</sub> (R <sub>2</sub> →X <sub>1</sub> )	1.3187	15
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>5/2</sub> (R <sub>1</sub> →X <sub>7</sub> )	1.4440	2.8

为了达到使某一波长实现激光振荡的方法,一般用改变谐振腔反射镜的光谱反射率或采用色散腔选频振荡的方法来选取某一特定的波长实现振荡放大;也可以设计对某些波长实现振荡抑制的损耗腔来实现另一波长的激光振荡。一般光学谐振腔由两个反射镜组成,其中一片为全反射镜,另一片为部分反射镜。两镜腔是最简单的光学谐振腔形式,适用于工作波长增益大,竞争谱线差异大的情况,通过光学镀膜高度选择性的多层介质膜<sup>[1]</sup>,就可以满足工作波长的增益要求,

而大大增加竞争谱线的损耗,从而产生单一谱线激光<sup>[5]</sup>。双镜腔适用于产生1.06μm,1.32μm等波长的激光。

当工作波长的激光增益远低于竞争谱线的增益时,双镜腔就不适用产生高损耗的抑制作用,此时可以采用多镜腔技术来产生谱线增益高差别化的要求,实现低增益谱线的激光振荡,多镜损耗腔由于容易实现对波长高的选择性,而在工程上比双镜腔更易于实现。

图1是采取的三镜损耗腔的原理图。M<sub>1</sub>为输出

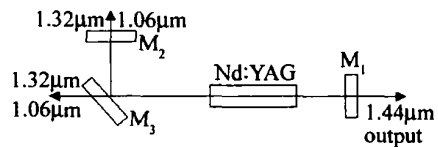


Fig 1 Fundamental design of 1.44μm Nd:YAG laser

镜,它对1.44μm波长的激光为半反输出镜,而对于1.06μm波长和1.32μm波长的光透过率较高,目的是增加这两波长的损耗而将大部分1.44μm波长的光反射回腔内进行振荡放大。M<sub>2</sub>和M<sub>3</sub>对1.06μm波长和1.32μm波长的光有较高的透过率,进一步增加对这两波长的光的损耗,使它们不能在腔内进行振荡。而对1.44μm波长的光为高反射率,以便使这一波长的光能在腔内进行谐振放大。

通过以上分析和阐述表明,设计一个对1.44μm波长以外的各个波长的高损耗腔从而仅仅使1.44μm波长的光在腔内进行谐振放大,最终获得该波长激光的输出,从原理上来说是可行的。关键是对谐振腔的各镜片的镀膜进行合理的设计。

通常,受激截面可以表征该谱线具有的增益,受激截面越大,获得的增益就越大。由于1.44μm波长对应的受激截面与1.06μm波长对应的受激截面相差25倍,与1.32μm波长对应的受激截面相差5倍<sup>[3]</sup>。三镜腔的组合反射率和透射率应该满足抑制1.06μm和1.32μm波长激光振荡,同时满足形成1.44μm波长激光振荡输出的条件。最理想的条件是M<sub>1</sub>,M<sub>2</sub>,M<sub>3</sub>3片反射镜都对1.06μm,1.32μm波长具有高的透过率和低的反射率,M<sub>2</sub>对1.44μm波长同时具有高反射率,M<sub>1</sub>对1.44μm波长同时具有15%的透过率(关于最佳输出镜的透过率选择,请参阅有关的技术文献)。考虑到膜系理论设计和实际样品的情况,给出了一组三镜腔的组合反射率和透射率分配数据,如表2所示。

Table 2 The request of coating for three reflection mirrors

	1.06μm	1.32μm	1.44μm
M <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> >95%;R <sub>1</sub> <3%	T <sub>1</sub> >50%;R <sub>1</sub> <50%	T <sub>1</sub> =15%;R <sub>1</sub> =85%
M <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> >95%;R <sub>2</sub> <3%	T <sub>2</sub> >50%;R <sub>2</sub> <50%	T <sub>2</sub> <0.5%;R <sub>2</sub> >99.5%
M <sub>3</sub>	T <sub>3</sub> >95%;R <sub>3</sub> <3%	T <sub>3</sub> >50%;R <sub>3</sub> <50%	T <sub>3</sub> <0.5%;R <sub>3</sub> >99.5%

三镜腔激光增益为:

$$G_1 = R_1 R_2 R_3 \exp(2gl) = R_1 R_2 R_3 A \quad (1)$$

式中,  $g$  为在反转的激光材料中单位长度的增益系数,  $l$  为激光材料的长度,  $G$  的下标  $i$  表示 3 镜腔。可见,  $A = \exp(2gl)$ 。

表 2 中各波长对应的激光增益:  $G_{1.144} = R_1 R_2 R_3 A_{1.144} = 0.85 \times 0.995 \times 0.995 A_{1.144} \approx 0.84 A_{1.144}$ ,  $G_{1.132} = R_1 R_2 R_3 A_{1.132} = 0.5 \times 0.5 \times 0.5 A_{1.132} \approx 0.13 A_{1.132}$ ,  $G_{1.106} = R_1 R_2 R_3 A_{1.106} = 0.05 \times 0.05 \times 0.05 A_{1.106} \approx 0.00013 A_{1.106}$

如果采用两镜腔达到三镜腔同样的参数, 则  $1.32\mu\text{m}$  和  $1.06\mu\text{m}$  波长对应的  $R_1, R_2$  反射镜的反射率和透过率为:  $R_{d1.32} = (R_1 R_2 R_3)^{1/2} = (0.5 \times 0.5 \times 0.5)^{1/2} \approx 35\%$ ;  $T_{d1.32} \approx 65\%$ ;  $R_{d1.06} = (R_1 R_2 R_3)^{1/2} = (0.05 \times 0.05 \times 0.05)^{1/2} \approx 0.011$ ;  $T_{d1.06} \approx 99\%$ 。

式中, 下标  $d$  表示 2 镜腔。

这一结果, 显然对镀膜的要求远高于三镜腔对镀膜的要求, 实现起来有很大的难度。

### 3 实验结果

实际上实现上述理想的三镜腔的条件受到红外多

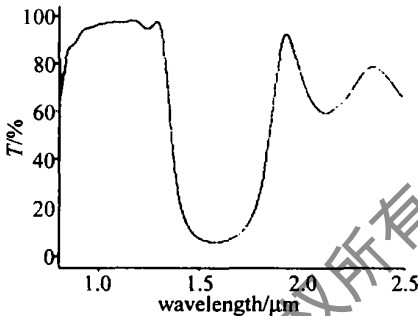


Fig 2 Transmission curve of  $M_1$

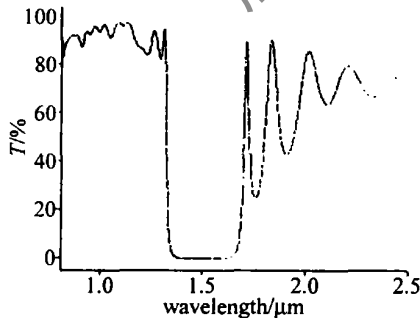


Fig 3 Transmission curve of  $M_3$

层介质膜镀制技术的限制, 不能得到理想的结果, 经过设计和实际镀制实验, 得到的  $M_1$  和  $M_3$  两种反射镜的透过率曲线如图 2 和图 3 所示。

实际镀制的 3 种反射镜的各种波长对应的透过率和反射率达到了表 2 中的要求, 采用上述三镜腔构成光学谐振腔进行实验, 用一根直径是  $5\text{mm} \times 80\text{mm}$  的 Nd:YAG 棒, 通过氙灯抽运入 150J 能量, 得到了  $1\text{J } 1.44\mu\text{m}$  波长的脉冲激光输出。实验得到的激光输出能量与氙灯抽运输入能量关系曲线见图 4。

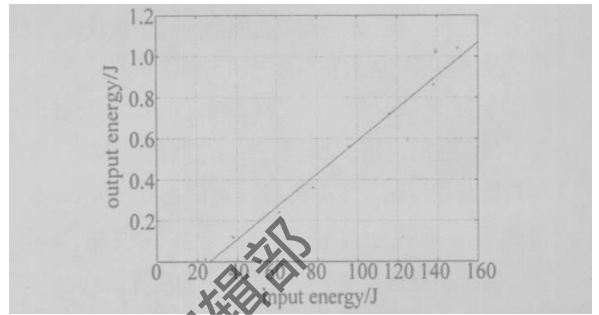


Fig 4 The relation curve of Xe lamp input energy and laser output energy

### 4 结 论

根据上述实验结果可以认为, 在三镜腔中,  $1.44\mu\text{m}$  波长的增益可以大于  $1.06\mu\text{m}$  和  $1.32\mu\text{m}$  等波长的增益, 具有谱线竞争的优势, 从而有效抑制高增益谱线的振荡。多镜腔在实现低增益谱线激光输出中具有结构简单, 谱线选择容易, 腔镜镀制要求容易满足等优点, 在工程应用中具有很好的实用价值。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] KRETSCHMANN H M, HEINE F H. High power diode pumped continuous wave  $\text{Nd}^{3+}$  lasers at wavelengths near  $1.44\mu\text{m}$  [ J ]. Opt Lett 1997, 22(7): 466~468.
- [ 2 ] SHI P, LI L, GAN A Sh *et al*. Thermal effect research of  $\text{Nd}^{3+}$  doped laser crystals in end pumped all-solid state lasers [ J ]. Laser Technology, 2004, 28(2): 177~180 (in Chinese).
- [ 3 ] PODLIPENSKY A V, YUMASHEV K V, KULESHOV N V *et al*. Passive Q-switching of  $1.44\mu\text{m}$  and  $1.34\mu\text{m}$  diode-pumped Nd:YAG lasers with a V:YAG saturable absorber [ J ]. Appl Phys 2003, B76(3): 245~247.
- [ 4 ] NIKOLAEV D A, KLIMOV I V, SHCHERBAKOV I A *et al*. Nd:YAG lasers operating at different wavelengths through  ${}^4\text{F}_{3/2}$ - ${}^4\text{I}_{13/2}$  transitions [ J ]. Laser Physics 2000, 10(2): 430~432.
- [ 5 ] KUBECEK V, COUDERC V. Laser diode pumped Nd:YAG laser operating at an eye-safe wavelength of  $1.443\mu\text{m}$  [ J ]. Electron Lett 1994, 30(25): 2139~2140.