

# 二极管泵浦 Nd:YAG 倍频蓝光激光器\*

曾昭信\*\* 史双瑾 徐海峰

(电子科技大学光电子技术系 成都 610054)

**【摘要】** 采用二极管尾端泵浦 Nd:YAG 激光器产生了 946 nm 波长振荡。在谐振腔内放入 KNbO<sub>3</sub> 晶体, 室温条件下得到了稳定的蓝色连续波激光, 输出功率达 1 mW。

**关键词** 二极管激光器; 端面泵浦; Nd:YAG; 倍频蓝光

中图分类号 TN248.13

国外在 1987 年<sup>[1]</sup>报道了 Nd:YAG 激光器产生 946 nm 的倍频蓝光, 这种全固态化的蓝激光器的研究目前正向着实用化和微片化方向发展<sup>[2-4]</sup>, 而国内未见关于这类蓝激光器研究的报道。

Nd:YAG 激光器通常产生 1.064 μm 的激光, 经 KTP 晶体倍频可以获得 532 nm 波长的绿光。实际上激光工作物质 Nd:YAG 中的 Nd<sup>3+</sup> 有三条较强的荧光谱线, 它们的中心波长及其对应的激光能级的跃迁各是 1.318 μm (<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>)、1.064 μm (<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>) 和 946 nm (<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>), 如图 1

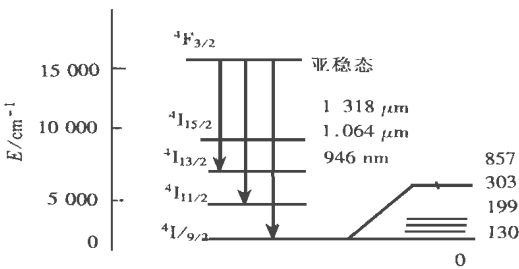


图 1 Nd<sup>3+</sup> 在钕铝石榴石中的能级和三条荧光谱线

所示。其中 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级跃迁的谱线最强, 它的增益较 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 谱线的增益高一个数量级左右, 这三条谱线的激光上能级又同为 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>, 所以 946 nm 要形成激光振荡就很困难。除了增益低起振困难外, 还在于 946 nm 激光振荡下的激光能级离基态很近, 实际上它是基态能级分裂出来的一个子能级, 其能量只比基态高 857 cm<sup>-1</sup>, 因而该能级受热激发影响很大, 在常温下也有热激发的粒子集居,

946 nm 激光振荡的机构应属于准三能级结构, 而 1.064 μm 的激光振荡机构属四能级结构, 三能级结构要实现粒子数密度集居的反转就比四能级结构困难得多。

二极管泵浦的蓝光激光器是全固态化的体积小使用方便, 若用于高密度的光存贮作读、写信息的光源, 能将现有光存贮的容量提高几倍, 蓝激光还可用于大信息容量的光通信、海水通信、彩色投影显示和测量、检测技术上。

## 1 946 nm 波长激光及其倍频

本文采用光学薄膜技术抑制 Nd:YAG 激光器的 1.064 μm 波长的振荡, 激光器的谐振腔是平行凹球面腔, Nd:YAG 加工成 1.5 mm 厚的平行平面晶片, 在靠近 LD 的一个端面镀有 946 nm 波长

\* 1997 年 6 月 2 日收稿, 1997 年 10 月 23 日修改定稿

\* 国防科工委和电子部预研基金资助项目

\*\* 男 60 岁 大学 教授

的高反介质膜(反射率 $>99.9\%$ ),而对 808 nm 波长透射,透射率约为 60%,这个面构成谐振腔的平面镜,谐振腔的凹面镜由一块曲率半径为  $R=52\text{ mm}$  的  $\text{K}_9$  玻璃镀制 946 nm 波长高反(反射率 $>99.8\%$ )和对 1.064  $\mu\text{m}$  和 473 nm 增透的介质膜构成。

从图 1 可看出激光工作物质的基态 $^4I_{9/2}$ 是一个多重态,946 nm 激光的下能级是基态能级在基质晶体场的影响下由斯塔克分裂而形成的一个子能级,该能级粒子的热集居满足波尔兹曼分布

$$\frac{N_m}{N_0} = \frac{g_m}{\sum_i g_i \exp(E_i/kT)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (1)$$

式中  $N_m$  为激光下能级的粒子数集居密度; $N_0$  为  $\text{Nd}^{3+}$  的掺杂浓度; $g_m$ 、 $g_i$  为各是  $m$  态和任一个子能级  $i$  态的简并度; $E_m$ 、 $E_i$  为各是  $m$  态和  $i$  态粒子的能量; $k$  为波尔兹曼常数; $T$  为工作物质的温度。在室温  $T=300\text{ K}$  情况下代入式(1)可以计算出约有  $\text{Nd}^{3+}$  浓度的 0.74% 的粒子集居到 946 nm 的激光下能级处,若 Nd:YAG 受热引起温升,则激光下能级热集居的粒子更多,为实现激光振荡,将需要更大的泵浦功率才能形成粒子数浓度集居的反转。氙灯泵浦 Nd:YAG 效率低晶体受热温升不能用于产生 946 nm 激光,二极管激光的谱线能做到与 Nd:YAG 的吸收峰一致,用二极管泵浦 Nd:YAG 效率高工作物质发热少,对 946 nm 激光机构是一种有效的泵浦方式。

就 LD 端面泵浦机构来讲,泵浦光斑在 Nd:YAG 晶片端面处的直径  $w_p$  和谐振腔内激光束在晶片端面的直径  $w_l$  的大小和相互关系对形成的激光的影响很大。 $w_p$  由 LD 的模式和聚焦光学系统决定,而  $w_l$  由高斯光束在平-凹谐振腔内的束腰决定

$$\text{振荡} \quad w_l = \sqrt{(\lambda L)/\pi} [(R-L)/L]^{1/4} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为光波长; $R$  为凹面镜的曲率半径; $L$  为谐振腔长度。 $w_p$  与  $w_l$  的大小共同决定了激光器的阈值,室温条件下出光的阈值泵浦功率<sup>[1]</sup>

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p (w_l^2 + w_p^2)}{2.4 \sigma \tau (1 - \alpha l)} (\delta + T_r + 2 N_{ml} \alpha l) \quad (3)$$

式中  $\nu_p$  为泵浦光的频率; $h$  为普朗克常数; $\sigma$  为介质的增益截面; $\tau$  为上激光能级的寿命; $\alpha$  为介质的吸收系数; $T_r$  为输出损耗; $\delta$  为谐振腔的固有损耗; $l$  为晶体的长度; $N_{ml}$  为下激光能级的粒子数集居的平衡浓度。为了减小工作物质的再吸收损失,要求  $w_l$  小,为了阻止高阶横模产生,要求  $w_p < w_l$ 。 $w_p$  与  $w_l$  的比值越小激光器的斜率效率就越高,一般可取  $w_l/w_p=0.5$  左右。

946 nm 激光经倍频可以获得 473 nm 的蓝色激光,倍频的晶体材料选用  $\text{KNbO}_3$ ,它有高的透明度,和  $\text{Ba}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ 、 $\text{LiNbO}_3$  等非线性晶体材料相比有更高的非线性系数和更大的光损伤阈值。 $\text{KNbO}_3$  晶体在  $220 \pm 4\text{ }^\circ\text{C}$  温度下属于正交晶系  $mm2$  点群,晶体的主轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  各自平行于结晶轴  $c$ 、 $a$ 、 $b$ 。对 946 nm 的基波在  $185\text{ }^\circ\text{C}$  的温度时可以实现 I 类非临介相位匹配,而在室温下只能获得角度相位匹配。当基波沿晶体的  $a$ - $b$  面传播,二次谐波偏振面的振动方向沿  $c$  轴时, $\text{KNbO}_3$  晶体可以对 857 nm ~ 982 nm 范围内的基波实现第 I 类角度相位匹配,其走离角不会超过  $1^\circ$ <sup>[5]</sup>。而倍频

的效率则和基波的功率密度有关,在低转换效率时,倍频效率与基波功率成正比,当在高转换效率时,在相位匹配条件下高斯光束的倍频效率经推导可以表示为

$$\eta = \tanh^2 \left[ \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/4} \left( \frac{I}{n^{2\omega}} \right)^{1/2} \frac{d_e \omega l_a}{n^\omega} \right] \quad \text{分布(4)}$$

式中  $I$  为基波功率密度;  $d_e$  为有效非线性系数;  $\omega$  为基波的角频率;  $l_a$  为倍频晶体长度;  $n^{2\omega}$  与  $n^\omega$  分别是倍频晶体对倍频波和基波的折射率。激光器谐振腔内靠平面镜一端光束的直径小功率密度高,倍频晶体靠近平面镜端放置可以得到较高的倍频效率。

## 2 实验结果

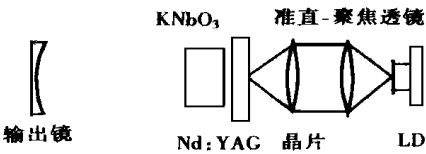


图 2 激光器结构图

实验系统布置如图 2 所示。LD 是国产 1 W 二极管激光器,激光经非球面镜和棱镜对的组合准直聚焦光学系统,将 LD 的光束聚焦到  $w_p = 60 \mu\text{m}$  直径的光斑照射到 Nd:YAG 晶片上,晶片正对 LD 的一面镀有介质膜作为谐振腔的平面镜,谐振腔的输出镜用一凹面镜构成,平面镜和凹面镜介质膜的反射率曲线各自如图 3a、3b) 所示。

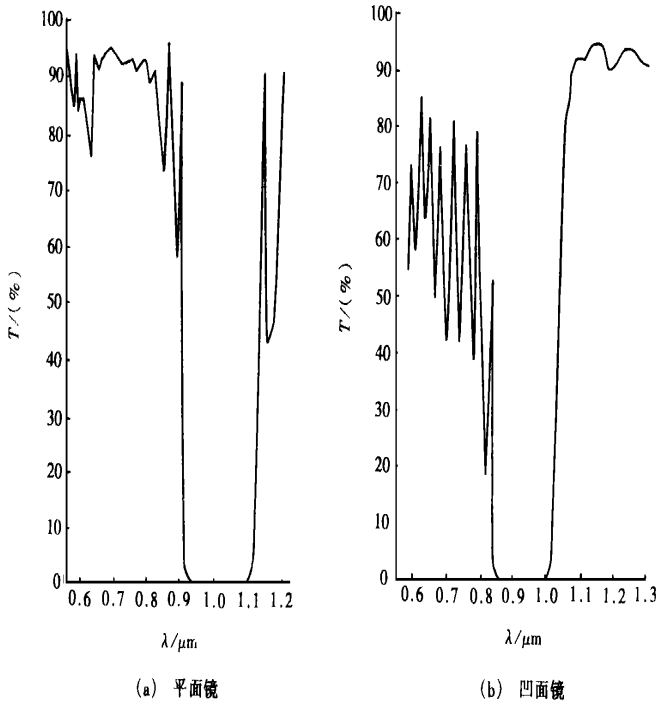


图 3 多层介质膜反射率-透射率曲线

激光二极管 LD 由自制的恒流温控电源驱动, 温控精度达到  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 它确保了 LD 输出激光的中心波长控制在 808.5 nm 处正好在 Nd:YAG 的 808 nm ~ 809 nm 的吸收峰内。振荡的阈值泵浦功率由式 (3) 决定, 泵浦光聚焦好能减小  $w_p$ , 拉长腔长能减小  $w_l$ , 均有利于降低阈值泵浦功率。在激光腔内放入  $\text{KNbO}_3$  晶体后经过精心调节就可以获得倍频的 473 nm 的蓝色激光。473 nm 的光功率随 LD 的电流增大而增强, 图 4 为实验曲线, 蓝激光输出功率可以达到 1 mW。

### 3 结 束 语

对 Nd:YAG 蓝激光器的研究仅是初步的, 实验系统待改进的方面有: 1) 提高 LD 聚焦光束的质量。仔细观察泵浦光斑发现不是一个单独的亮点, 在它附近还存在一些次亮斑使光斑面积扩大。分析原因是 LD 光场分布不均匀所致, 光斑的扩大将为高阶横模提供起振的条件。我们做了拉长腔长到 46 mm 的实验, 按式 (3) 计算  $w_l = 70 \mu\text{m}$ , 此时 Nd:YAG 激光束已呈明显的高阶横模结构, 这表明泵浦光斑的面积较实测的光斑直径  $60 \mu\text{m}$  大。2) 提高聚焦光学系统的效率。测试现在的聚焦光学系统效率仅为 40%。3)  $\text{KNbO}_3$  晶体加温控。处于非临界相位匹配的  $\text{KNbO}_3$  晶体其相位匹配角随温度的变化是很灵敏的, 为保证在环境气温变化时稳定地出光, 晶体的温控也是必要的。目前, 新设计的实验系统重点将放在提高输出光功率和改善光束质量上。

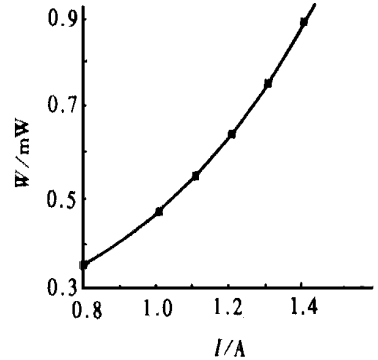


图 4 473 nm 激光输出功率与 LD 泵浦电流的关系曲线

### 参 考 文 献

- 1 Risk W P, Lenth W. Room-temperature, wntinuos-wave 946 nm Nd:YAG laser by laser-diode arrays and intracavity frequency donbling to 473 nm. *Optics Letters*, 1987, 12(12):809 ~ 811
- 2 Hollemann G, Peik E, Walther H. Frequency-stabilized diode-pumped Nd:YAG laser at 946 nm with harmonics at 473 nm and 237 nm. *Optics Letters*, 1994, 19(3):192 ~ 194
- 3 Pruneri V, Koch R, Kazansky P G et al. 49 mw of CW blue light generated by first-order quasi-phase-matched frequency doubling of a diode-pumped 946 nm Nd:YAG laser. *Optics Letters*, 1995, 20(23):2375 ~ 2377
- 4 Matthews D G, Conroy R S and Sinclair B D. Blue microchip laser fabricated from Nd:YAG and  $\text{KNbO}_3$ . *Optics Letters*, 1996, 21(3):198 ~ 200
- 5 Biaggio I, Kerkoc P, Wu L S. Refractive indices of orthorhombic  $\text{KNbO}_3$ , II. Phase-matching configurations for nonlinear-optical interactions. *J Opt Soc Am B*, 1992, 9:507 ~ 517

# Blue-light Source of Diode-pumped Frequency Doubled Nd<sup>3+</sup>YAG Laser

Zeng Zhaoxin Shi Shuanggin Xu Haifeng

(Dept of Opto-Electronics Technology, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** 946 nm light oscilation is operated with a diode end-pumpde Nd<sup>3+</sup>YAG laser Puting. a KNbO<sub>3</sub> crystal into the laser cavity, a stabilized CW 473 nm blue laser is obtained at room temperature. The output power reaches 1 mW.

**Key words** diode laser; end-pump; Nd<sup>3+</sup>YAG double-frequency blue light

编辑 黄 辛

°科研成果介绍°

## L<sub>x</sub> 频段高速跳频频率合成器

主研人员: 李少谦 冯晓东 程国辉 洪福明 杨毅生 葛造坤

L<sub>x</sub> 频段高速跳频频率合成器是 TIS 系统的核心部分, 它能完成 TIS 系统每秒 3 万 8 千余跳的跳频任务, 是目前跳频速率最高的频率合成器, 完全达到了美国 JTIDS 系统的技术要求, 为我国研究 TIS 系统打下了良好的基础。该成果的主要技术指标属于国内领先, 并达到了国外 90 年代的水平。

## 微波介质陶瓷

主研人员: 杨传仁 游文南 杨成韬 周大雨 唐宗熙 叶耀红 林劲先

微波介质陶瓷材料具有介电常数大、损耗小、温度稳定性好的特点, 可用于制作微波介质谐振器、微波片式多层陶瓷电容器(MLC)、高介电常数微波基片、介质波导等微波元件, 从而制作出介质振荡器、介质滤波器、调制与解调器、双工器、微波混合集成电路(HMIC)等新一代微波器件及部件。其应用领域涉及微波通信、雷达制导、电子对抗等军事电子武器系统及移动通信、卫星广播电视、汽车防撞雷达等民用微波系统。

°科 卞°