

文章编号: 1001-3806(2003)02-0101-02

## 1J 倍频 Nd:YAG 激光器

曹三松 张向阳 黄燕琳 李光荣 苏心智  
(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 报道了倍频 Nd:YAG 固体激光器的研究结果, 激光器系统由一级板条 Nd:YAG 激光振荡器、三级板条放大器和 KTP 倍频晶体等构成, 输出倍频激光能量大于 1J, 脉冲重复频率 1Hz, 脉冲宽带 6ns~9ns, 倍频效率约为 48%。

关键词: 倍频; Nd:YAG; 固体激光器

中图分类号: TN248.1+3 文献标识码: A

## 1J high energy frequency-doubled Nd:YAG laser

Cao Sansong, Zhang Xiangyang, Huang Yanlin, Li Guangrong, Su Xinzhi  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: The development of frequency-doubled Nd:YAG laser, consisting of an oscillator, three amplifiers, a KTP frequency doubler and etc., is reported. The system can produce energy higher than 1J at 532nm. It operates at a pulse repetition rate of 1Hz, a pulse width of 6ns~9ns. An energy conversion efficiency of 48% for second harmonic generation of 532nm radiation from 1064nm radiation has been achieved.

Key words: frequency-doubled; Nd:YAG; solid-state laser

### 引 言

扩展激光器的输出波长是固体激光器件研究的重要内容之一, 通过非线性光学的方法将 Nd:YAG 激光器输出的 1064nm 激光倍频为 532nm 的绿光输出, 能够满足许多实际应用的需求。国外曾采用 KD\*P 晶体<sup>[1]</sup>和 KTP 晶体<sup>[2]</sup>获得了焦耳级 Nd:YAG 倍频绿光输出。国内采用 KTP 晶体也实现了高功率连续或准连续 Nd:YAG 倍频绿光输出<sup>[3]</sup>, 另外进行过重频脉冲 Nd:YAG 激光 KTP 倍频实验<sup>[4]</sup>。本文中介绍了笔者得到的重频脉冲 Nd:YAG 激光器 KTP 晶体倍频的研究结果。

### 1 理 论

由二次谐波理论可知, 要实现高转换效率, 基波激光和二次谐波激光应满足位相匹配条件, 即  $\Delta k = 0$ , 这时基波和谐波的耦合波方程为<sup>[5]</sup>:

$$\partial E_1 / \partial z = -i(\omega_1 / 2n_1) \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} d_{\text{eff}} E_2 E_1^* \quad (1)$$

$$\partial E_2 / \partial z = -i(\omega_2 / 2n_2) \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} d_{\text{eff}} E_1^2 \quad (2)$$

方程中,  $E_1$  和  $E_2$  分别是基波和谐波电场,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为基波和谐波频率,  $n_1$  和  $n_2$  分别是倍频晶体对基波和谐波的折射率,  $\mu_0$  为真空中磁导率,  $\epsilon_0$  为真空中电容率,  $d_{\text{eff}}$  为有效非线性系数。在上述方程中,  $E_1 = E_1(z) e^{i\varphi_1(z)}$ ,  $E_2 = E_2(z) e^{i\varphi_2(z)}$ , 其中  $E_1(z)$ ,  $E_2(z)$  均为实振幅,  $\varphi$  为相位。令  $E_{01}(z) =$

$$\sqrt{\frac{n_1}{\omega_1}} E_1(z), E_{02}(z) = \sqrt{\frac{n_2}{\omega_2}} E_2(z),$$

由于谐波的位相比产生它的极化波落后  $\pi/2$ , 将  $E_{01}(z)$  和  $E_{02}(z)$  代入(1)式和(2)式, 就得出耦合波振幅方程(不考虑位相变化):

$$\frac{dE_{01}(z)}{dz} = -\frac{1}{2} K E_{01}(z) E_{02}(z) \quad (3)$$

$$dE_{02}(z)/dz = K E_{01}^2(z)/2 \quad (4)$$

$$\text{式中, } K = \omega_1 \sqrt{(\mu_0 / \epsilon_0)(\omega_2 / n_2)} d_{\text{eff}} / n_1 \quad (5)$$

在基波和谐波相互作用的过程中, 平均能流密度守恒, 即:

$$S_1(z) + S_2(z) = S_1(0) \quad (6)$$

$$\text{式中, } S_i(z) = \frac{P_i}{A} = \frac{n_i}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_i E_i^* \quad (i = 1, 2) \quad (7)$$

式中,  $P_i$  是入射功率,  $A$  是光束面积。  $S_1(0)$  是入射端面处的基频光能流密度, 因此,

$$E_{01}^2(z) + 2E_{02}^2(z) = E_{01}^2(0) \quad (8)$$

作者简介: 曹三松, 男, 1959 年 7 月出生。高级工程师。现从事激光器件和技术的研究工作。

收稿日期: 2002-07-03; 收到修改稿日期: 2002-08-13

将(8)式代入(4)式,得到:

$$dE_{02}(z)/dz = K[E_{01}^2(0) - 2E_{02}^2(z)]/2 \quad (9)$$

由于  $E_{02}(z)|_{z=0} = 0$  (10)

则方程(9)的解为:

$$E_{02}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{01}(0) \tanh\left[\frac{K}{\sqrt{2}} E_{01}(0) z\right] \quad (11)$$

这样就得出在相位匹配下的倍频效率为:

$$\eta = \frac{|E_2(z)|^2}{|E_1(0)|^2} = \tanh^2\left[l\sqrt{B\left(\frac{P_1}{A}\right)}\right] \quad (12)$$

式中,  $B = (2/n_1^3) \sqrt{(\mu_0/\epsilon_0)^3 \omega_1^2 d_{eff}^2}$  (13)

式中,  $l$  为非线性晶体长度。

KTP 晶体是一种性能优良的倍频晶体,它具有

较大的非线性系数,在室温下就能实现相位匹配,而且角宽度和温度带宽很大,损伤阈值较高,性能稳定,耐潮湿。根据(12)式计算得出 KTP 晶体(长度  $l = 7\text{mm}$ )倍频效率随基波功率密度的变化结果,如图 1 所示,图中同时给出了 KD\*P 倍频晶体(长度  $l = 30\text{mm}$ )的计算结果。由此可知:

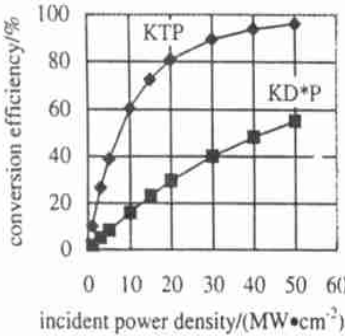


Fig. 1 The conversion efficiency of KTP and KD\*P calculated as a function of the incident power density of 1064nm

由于具有较大的非线性系数,因此在较低的入射基波功率密度下,就可达到很高的倍频效率。但是,随着基波功率密度增加,倍频效率增加变缓。另外,由

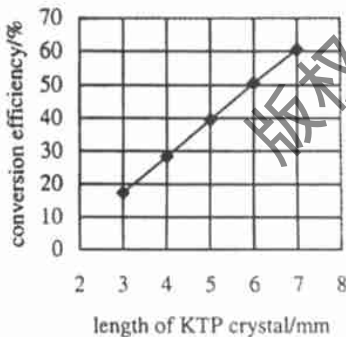


Fig. 2 The conversion efficiency of KTP calculated as a function of crystal length

(12)式计算出当基波功率密度为  $10\text{MW}/\text{cm}^2$ ,KTP 晶体的倍频效率随晶体长度变化情况,如图 2 所示。理论分析说明,选择非线性系数较大的 KTP 晶体,并适当增加晶体的长度有利于实现高效率倍频激光输出。需要指出的是,由于上述理论分析中没有考虑倍频晶体对基波和谐波的损耗等因素,因此,所得

出的数量关系只是一种近似结果,实际的倍频效率低于理论值。

## 2 实验

图 3 是倍频激光实验装置的示意图,实验装置

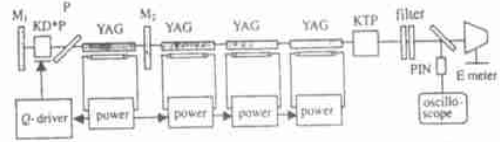


Fig. 3 Experimental set-up

系统由闪光灯泵浦 Nd:YAG 激光振荡器、三级闪光灯泵浦 Nd:YAG 激光放大器、倍频晶体、激光电源、冷却器和测量仪器等组成。Nd:YAG 激光振荡器采用 KD\*P 电光调 Q 工作为单谐振腔为平-平腔,放大器为单通行波放大器,三级放大器中板条 Nd:YAG 晶体尺寸为  $8\text{mm} \times 16\text{mm} \times 100\text{mm}$ ,  $8\text{mm} \times 16\text{mm} \times 114\text{mm}$  和  $8\text{mm} \times 16\text{mm} \times 120\text{mm}$ 。激光电源由三路开关型激光电源组合构成,每级电源的最大泵浦能量为 60J,控制部分包括电光调 Q 驱动电源,调压范围  $2000\text{V} \sim 5000\text{V}$  连续可调,退压延时范围  $-50\mu\text{s} \sim 300\mu\text{s}$ 。另外,各级电源之间级间延时范围可调,为  $-50\mu\text{s} \sim 250\mu\text{s}$ 。实验所用的 KTP 倍频晶体是按 1064nm 的 II 类相位匹配切割定向,匹配角为  $23.6^\circ$ ,通光长度为 7mm,入射面和出射面都镀有对 532nm 和 1064nm 激光的双增透膜。1064nm 吸收片用于滤除基波,激光能量计经过中国计量科学院标定,采用快速光电二极管和 Tektronix 公司示波器测量

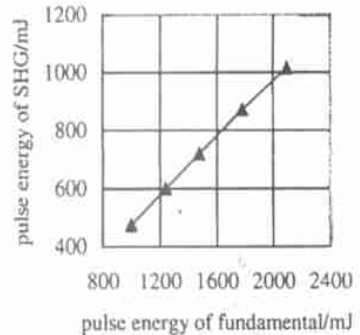


Fig. 4 Pulse energy of SHG versus pulse energy of fundamental

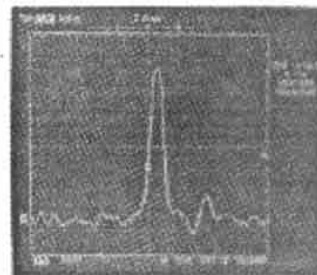


Fig. 5 Temporal pulse profile of SHG pulse

激光脉冲波形和宽度。

实验结果如图 4、图 5 所示。在实验中,基波激光以脉冲重频 1Hz 工作,当振荡级的泵浦能量 54.4J 时,输出调 Q 激光脉冲能量  $432.2\text{mJ}/\text{pulse}$ ,

(下转第 105 页)

为 4m/min。

## 2.4 送丝速度

铝合金中含有 Mn, Zn 等低沸点元素, 在焊接过程中低沸点元素的蒸发很剧烈, 这些元素的过度烧损, 将导致焊缝表面下凹, 使用填充焊丝可防止焊缝下凹。填充焊丝的送丝速度对焊缝质量有较大影响, 过大的送丝速度将导致焊缝余高过大, 影响焊接熔深, 而送丝速度太小则会产生不规则的焊缝成形。通过焊接实验确定送丝速度为 2.5m/min。另外, 焊丝末端相对激光焦点位置的偏移量不能太大, 应控制在 0.5mm 内, 否则焊丝将不能完全熔化, 造成焊缝不连续。

## 3 实验结果

焊接结束后, 在显微镜下观察焊缝表面, 未发现中心贯穿裂纹。图 3 是激光焊接铝合金 2007 的焊缝截面图, 由图可知, 焊缝宽度及熔深达到焊接要求, 焊缝中存在气孔, 这就会导致焊缝的力学性能下降, 如拉伸强度和致密性下降。

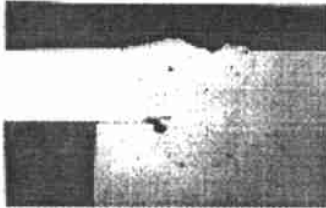


Fig. 3 Cross section of weld seam  
 $P = 3500\text{W}$ ,  $v_{\text{weld}} = 4\text{m/min}$ ,  
 $v_{\text{filler}} = 2.5\text{m/min}$ , defocus = 0

气孔产生的机理较为复杂, 主要为氢气孔。在熔融状态的铝合金中, 氢的溶解度很高, 熔池中吸收了大量氢气, 随着焊缝的冷却, 氢的溶解度迅速下降, 多余的氢气从熔融金属中逸出, 形成气泡。一部分气泡在焊缝凝固前上升到熔池表面, 从而释放到空气中, 而部分气泡未能在焊缝凝固前上升到熔池表面, 最终形成气孔。

(上接第 102 页)

通过三级激光放大器后, 激光输出能量达到 2.097J/pulse, 三级激光放大器的总泵浦能量为 135J/pulse。当基波能量为 2.1J/pulse 时, 通过 KTP 晶体倍频后, 滤除剩余基波, 532nm 激光输出能量为 1.015J/pulse, 倍频效率约为 48%。图 4 是二次谐波输出能量与基波入射能量的关系, 图 5 是倍频激光的脉冲波形, 脉冲宽度为 6~9ns。

## 3 结论

对脉冲闪光灯泵浦的 Nd:YAG 倍频激光器进行了研究, 采用 KTP 倍频晶体获得 532nm 激光输出能量大于 1J, 脉冲重复频率 1Hz, 脉冲宽度约 6ns

氢气的来源主要有: (1) 母材与填充焊丝中含有氢; (2) 焊接部位有油或油脂; (3) 周围空气中温度较大, 或保护气体不纯。

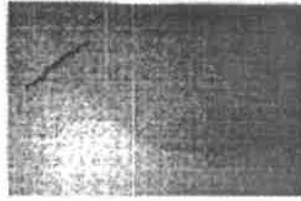


Fig. 4 Hot cracks in heat affected zone (HAZ) 60°

另外, 在金相显微镜下观察焊缝情况, 发现在热影响区内存在热裂纹, 如图 4 所示。由于采用高功率密度的激光焊接, 同时添加 AlSi12 填充焊丝, 而且焊接速度快, 使得注入到母材中的热量较小, 热影响区窄, 焊缝的抗裂性能明显要比 TIG, MIG 焊接要好。

## 4 结论

实验表明, 用高功率连续 Nd:YAG 激光添加填充焊丝焊接铝合金 2007 不仅工艺简单, 而且焊接速度快、效率高, 焊接热裂纹受到抑制。但由于不能完全避免热裂纹的产生, 以及还存在气孔, 因此, 激光焊接铝合金 2007 只能应用于气密性要求低、密封压力不高、拉伸强度较低的情况。

## 参考文献

- [1] 许国良. 中国激光, 2000, A27(2): 183~186.
- [2] Katayama S, Matsunawa A. J Light Metal & Construction, 1991, 29(8): 8~10.
- [3] 王希靖. 甘肃工业大学学报, 1994, 20(1): 18~23.
- [4] 关振中. 激光加工工艺手册. 北京: 中国计量出版社, 1998: 9~11.
- [5] Yamake H, Yuki M. 轻金属焊接, 1991, 29(11): 45~49.
- [6] 李晓梅. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(2): 285~288.
- [7] 梅汉华, 肖诗荣. 北京工业大学学报, 1996, 22(3): 39~42.

~9ns, 倍频效率约为 48%。

感谢山东中晶光电子公司、福建 CASTECH 公司、北京士威奇电子技术研究所、中国计量科学院和本所有关部门对本工作的大力支持。

## 参考文献

- [1] Kogan R M, Crow T G. Appl Opt, 1978, 17(6): 927~930.
- [2] Tei K, Kato M, Matsuoka F. Appl Opt, 1999, 38(21): 4548~4551.
- [3] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 何学东, 张世文, 闫连山 et al. 激光与红外, 1996, 26(10): 25~29.
- [5] Yariv A. Quantum electronics. 2nd, New York: John Wiley & Sons, Inc, 1975.