

高效高重复率 Q-YAG 倍频脉冲激光器 泵浦钛宝石激光器输出特性的研究^{*}

赵尚弘 陈国夫 王屹山 王贤华 侯 洵

(中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

提要 用国产声光调 Q-YAG 倍频脉冲激光器泵浦钛宝石激光器, 从理论和实验上研究了该激光器的输出特性, 泵浦功率为 8.1 W 时获得了 2.08 W 的钛宝石光脉冲输出, 稳定的斜度效率为 30%。

关键词 高重复率, 高效, 高功率, 钛宝石激光

1 引言

钛宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)激光的产生和放大是近年来固体激光领域内的一大研究热点, 这是由它具有宽的荧光谱和吸收谱、导热性好、均匀、硬度大等优点而成为理想的固体激光源, 因而具有广泛的应用领域。实验中常采用 Ar^+ 激光器或 YAG 激光器作为泵浦源, 输出的钛宝石光波长在 750~880 nm 之间, 目前除用 Ar^+ 激光器泵浦钛宝石, 利用各种锁模技术产生脉宽为飞秒级的超短脉冲用于超快过程的研究外, YAG 泵浦钛宝石产生的高功率、高重复率的纳秒光源还可开展生物、医学和光电子器件等方面的研究, 另外, YAG 激光器也是钛宝石飞秒脉冲的放大器的主要泵浦光源。然而利用 YAG 激光器的二次谐波作为泵浦源时, 由于其光束质量差, 光束的发射角大, 特别在高重复率、高功率输出的 YAG 倍频激光器的空间模一般为均匀分布或是多横模, 这些缺陷使得声光调 Q 倍频 YAG 激光器作为泵浦源时不易使泵浦光束与腔模有很好的匹配, 因而难以提高激光器的斜度效率和输出功率。所以, 仔细研究适用于这类泵浦源的高效激光腔就具有十分重要的意义, 本文报道我们这方面的一些理论分析和实验结果。

2 YAG 激光器泵浦钛宝石的振荡腔分析

YAG 激光器泵浦的钛宝石晶体是一种 Kerr 介质, Haus 等人^[1]提出, 对于腔内含有 Kerr 介质的振荡腔, 腔内的高斯光束的 q 参数的传播方程为

$$-\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{q}\right) = \frac{1}{q^2} + K \text{Im}^2\left(\frac{1}{q}\right) \quad (1)$$

^{*} 国家科委攀登计划 A 飞秒激光技术与超快过程研究。

中国知网 <https://www.cnki.net>
收稿日期: 1995 年 10 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 1 月 19 日

其中 K 为 Kerr 系数, 定义为

$$K = \frac{8p}{\pi} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 n_0 n_2$$

其中 p 为腔内功率, n_0 和 n_2 分别是 Kerr 介质(钛宝石)的线性和非线性折射率, λ 是光在真空中的波长, Im 表示虚部。

显然, 如果 $K = 0$ ($n_2 = 0$), 则方程(1)与自由空间中高斯光束的传播方程相同。为此定义新的 q 参数为

$$\frac{1}{q'} = \text{Re}\left[\frac{1}{q}\right] + S \text{Im}\left[\frac{1}{q}\right] \overline{1 - K} \quad (2)$$

此时可以验证:

$$-\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{q'}\right) = \frac{1}{q'}$$

可见, 如果以 q' 作为腔内有 Kerr 介质的高斯光束的等效 q 参数, 则高斯光束在腔内的传播可用自由空间传播同样的方程描述, 这时可把一段长为 S 的 Kerr 介质(钛宝石)看成一段长为 $S/n_0 = L$ 的线段处理, 然后利用 ABCD 定律进行分析。

现考虑如图 1 所示的四镜腔。 M_1 和 M_2 是两个凹面镜, 焦距相等为 f , 钛宝石棒长为 S , 等效

长度 $L = S/n_0$, M_1 和 M_2 距钛宝石两个端面的距离分别为 r_1 和 r_2 。

设平面镜 P_1 镜面上的 q 参数为 $q_1 = iy_1 = i(\pi\omega^2/\lambda)$, 其中 λ 是钛宝石激光在自由空间的中心波长, ω 是 P_1 镜面上的高斯光束光斑尺寸。可以求得经过 $P_1 \leftrightarrow M_1 \leftrightarrow M_2 \leftrightarrow P_2$, 一个振荡循环后的总矩阵为

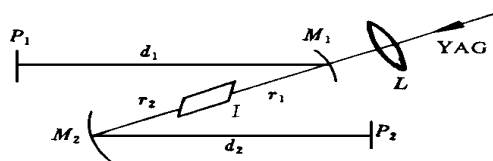


Fig. 1 Schematic diagram of the YAG laser pumped Ti:sapphire laser

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \frac{1}{f^4} \begin{pmatrix} [(d-f)(\delta-f) - fd]^2 & 2(d-f)[(d-f)(\delta-f) - fd] \\ + (\delta-2f)(d-f) & \cdot [(d-f)\delta - 2fd] \\ 2(\delta-2f)[(d-f) & [(d-f)(\delta-f) - fd]^2 \\ \cdot (\delta-f) - fd] & + (\delta-2f)(d-f) \\ & \cdot [(d-f)\delta - 2fd] \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $S = L + r_1 + r_2$, $d = (d_1 + d_2)/2$, 注意到 $A = D$ 。

利用 ABCD 定律

$$q_1' = \frac{Aq_1' + B}{Cq_1' + D} \quad (4)$$

以及定义(2)可求得镜面 P_1 上的光斑尺寸为

$$\omega = \left\{ \frac{\lambda}{\pi} \frac{1-K}{\delta-2f} \cdot (d-f) \frac{[2fd - (d-f)\delta]}{\delta-2f} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

由此可用同样方法求得钛宝石棒靠近凹面镜 M_1 的端面 I 处的光斑尺寸:

$$\omega = \left\{ \frac{\lambda}{\pi} \frac{1-K}{f^2} \left[f r_1 + d(f-r_2) \right]^2 + (f-r_1)^2 y_1^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

式中 $y_1^2 = (\frac{\pi\omega}{\lambda})^2$, ω 由(5) 式可计算。

以上我们求得四腔腔中钛宝石棒端面 I 处腔模的光斑尺寸表达式, 只要代入具体腔参数就可计算。下面我们再来求解泵浦光经过聚焦镜 L 和泵浦源 M₁ 后到达 I 处的光斑尺寸。

设泵浦光入射到聚焦透镜 L 上, 该处的光斑尺寸为 ω , 曲率半径为 R_L , 则经过透镜 L 和凹面镜 M 后到达钛宝石棒端面 I 处的 q 参数的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - \frac{r_l}{f})(1 - \frac{l}{f_l}) - \frac{r_l}{f_l} & l(1 - \frac{r_l}{f}) + r_l \\ -\frac{1}{f}(1 - \frac{l}{f_l}) - \frac{1}{f_l} & 1 - \frac{l}{f} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 f_l 是透镜 L 的焦距, l 是透镜 L 与泵浦镜 M₁ 的中心距, 利用 ABCD 定律所得 I 处的泵浦光的光斑尺寸为

$$\omega_P = [(A + \frac{B}{R_L})^2 + (\frac{B\lambda}{\pi\omega})^2]^{1/2} \cdot \omega \quad (8)$$

其中 A、B 见矩阵(7) 中的相应值。

于是, 只要代入具体腔参数就可通过式(5)、(6)、(8) 求得钛宝石棒端面 I 处腔核的光斑尺寸和泵浦光的光斑尺寸, 通过比较二者的大小来判断它们之间的匹配情况。

在具体计算时可作如下近似:(1) 对 YAG 泵浦的钛宝石激光器, 一般输出功率都在数瓦量级, 简单估计可知 K 值很小, 故可认为 $K \approx 0$;(2) 在(8) 式中, 曲率半径 R_L 比其值都大得多, 而且 B/R_L 更小, 故可认为 $B/R_L \approx 0$ 。另外应注意到泵浦光通过 M₁ 时有发散效果, 故在矩阵(7) 中的计算时应把 f 取为负值。

3 实验及结果

我们设计的声光调 Q 倍频 YAG 激光器泵浦钛宝石激光器腔形如图 2 所示。图中 YAG 是声光调 Q 倍频激光器, L 是聚焦镜, M₁ 和 M₂ 是双色镜, 对 YAG 的 0.532 μm 光透过率大于 98%, 对钛宝石光 0.75~0.88 μm 范围的反射率大于 92%, P₂ 是全反平面镜, P₁ 是输出平面镜。腔内钛宝石晶体两端面布氏角切割, 棒长为 20 mm。

实验发现, 对 $f = 5 \text{ cm}$ 的凹面镜构成的腔, 用 7W 的 YAG 激光泵浦时钛宝石光输出功率在 1 W 以下, 一般是在 700~800 mW 之间, 而且这时的激光输出斜度效率很低(10%左右), 经过分析我们认为可能是短焦距腔不能形成与泵浦光相匹配的腔模, 故影响激光振荡和输出。其实根据我们所推得的公式(5)~(8), 对于该情况下的腔体参数: $d_1 = 0.7 \text{ m}$, $d_2 = 0.63 \text{ m}$, $f = 0.05 \text{ m}$, $r_1 = 0.045 \text{ m}$, $r_2 = 0.051 \text{ m}$, $S = 0.02 \text{ m}$, $L = S/n_0 = 0.011 \text{ m}$ ($n_0 = 1.76$), $\lambda = 0.79 \times 10^{-6} \text{ m}$, 可求得此时腔模在 P₁ 和钛宝石端面 I 处的光斑尺寸分别为

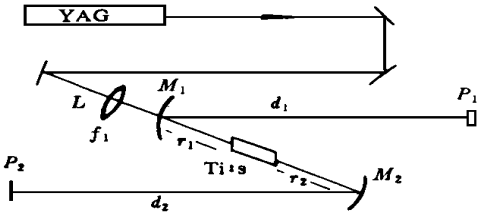


Fig.2 Frequency doubled Q-switched Nd : YAG laser pumped Ti:sapphire laser

$\omega = 1.24 \times 10^{-4} \text{ m}$

$$\omega = 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

而聚焦镜 $f_l = 0.14 \text{ m}$, $l = 0.09 \text{ m}$, 在聚焦镜 L 处的光斑尺寸为 $\omega \approx 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, 则可求得泵浦光在钛宝石端面 I 处的光斑尺寸为

$$\omega_p \approx 0.357 \times 2 \times 10^{-3} \approx 0.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

由此可见, $\omega_p/\omega \approx 14$, 这表明此时腔模的体积相比泵浦光束很小, 泵浦光在钛宝石中未被充分、均匀地吸收, 所以输出功率和斜度效率会很低。此时若改用长焦距泵浦镜, 可以预见, 实验结果会有所改进, 于是我们在实验中改用 $f = 0.125 \text{ m}$, $r_1 = 0.12 \text{ m}$, $r_2 = 0.13 \text{ m}$, 用实验室现有的聚焦镜 $f_l = 11 \text{ cm}$, $l = 5 \text{ cm}$, 同样的左右臂长和棒长, 经计算得

$$\begin{cases} \omega = 0.556 \times 10^{-3} \text{ m} \\ \omega = 0.782 \times 10^{-4} \text{ m} \\ \omega_p = 1.64 \times 10^{-4} \text{ m} \end{cases}$$

此结果表明 $\omega_p/\omega \approx 2$, 可见腔模和泵浦光在钛宝石棒上的匹配效果明显改善。

实验中经过反复调试发现, 改进后的腔体的输出功率和斜度效率大大改善。测得输出功率与泵浦功率的关系、脉冲形状等如图 3~6 所示。

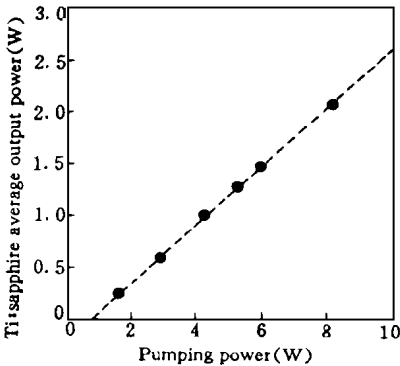


Fig. 3 Measured output power versus pumping power

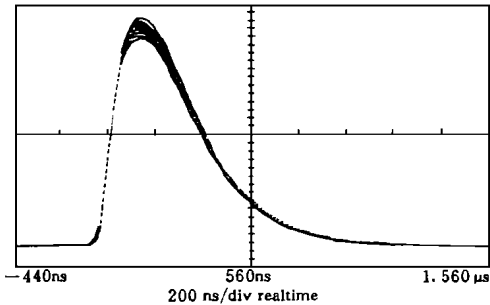


Fig. 4 Frequency-doubled Q-YAG laser pulse (pulse width averaged over 10 pulses is 382.3 ns)

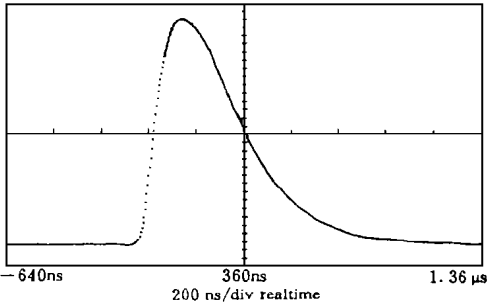


Fig.5 Ti:sapphire laser pulse with pulse width being 390.2 ns

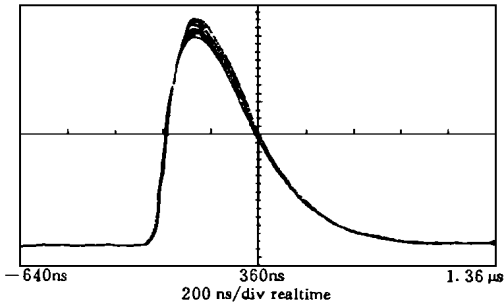


Fig.6 Ti:sapphire laser pulse (pulse width averaged over 10 pulses is 375 ns)

实验中我们采用 5 kHz 的高重复率 YAG 光脉冲泵浦钛宝石, 在 8.1 W 泵浦时, 获得 2.08 W 的输出功率(输出镜 10%)。脉冲宽度为 390 ns, 单个脉冲峰值功率高于 $1 \times 10^3 \text{ W}$, 有稳定的斜度效率为 30%, 此值与已报道的最高值相同^[2]。图 3 的直线表明改进后的腔中泵浦光与腔

膜匹配良好, 使泵浦光能充分、均匀吸收。因而有高功率、高效率的激光输出。很显然, 若再试用更适宜的腔镜 M_1 和 M_2 , 还会更进一步改进该激光器的性能, 尽管能开发的潜力已很有限。

参 考 文 献

- 1 H. A. Nans, E. P. Ippon. Analytic theory of additive pulse and Kerr lens mode locking. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1992, **QE-28**: 2086~2096
- 2 S. Takouchi, T. Kobagashi. Highly efficient Ti : sapphire regenerative amplifier. *Opt. Commun.*, 1994, **109**: 518~526

Study of a High-efficiency High-repetition-rate Frequency Doubled Q -switched Nd : YAG Laser Pumped Ti : sapphire Laser

Zhao Shanghong Chen Guofu Wang Yishan Wang Xianhua Hou Xun
(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract A Ti : sapphire laser pumped by a frequency doubled Q -switched Nd : YAG laser is studied theoretically and experimentally. In experiment when pumping power is 6.8 W and with a repetition-rate of 5 kHz, an output power of 2.185 W is obtained with a stable slope efficiency 30%.

Key words high repetition rate, high efficiency, high power, Ti : sapphire laser