

文章编号: 0258-7025(2002)05-0385-04

LD 抽运的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器

陈卫标^{1,2}, Nobuo Takeuchi²

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ²CEReS, 千叶大学, 千叶 263-8522, 日本)

提要 研究了不同谐振腔下不同透射率的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 Q 的激光输出特性。采用透射率为 82% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, 在抽运功率 1.1 W 时, 激光重复频率小于 3 kHz, 单脉冲能量达 20 μJ , 可以作为微脉冲激光雷达的发射光源。分析和比较了实验结果和理论计算, 两者吻合较好。

关键词 激光二极管抽运, 被动调 Q, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, 微脉冲激光雷达

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Diode Pumped, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched $\text{Nd}:\text{YAG}$ Laser

CHEN Wei-biao¹, Nobuo Takkeuchi²

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
²CEReS, Chiba University, Chiba 266003, Japan

Abstract In order to look for a cheap compact laser source for a micro pulse lidar to remotely sense aerosol and cloud in the troposphere, the studies of diode pumped, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ passively Q-switched $\text{Nd}:\text{YAG}$ lasers were presented. Using different laser cavities with different initial transmissions of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, the output properties of laser were demonstrated. The output energy of 20 μJ per pulse and the repetitive frequency of 2.8 kHz were generated by a LD with 1.1 W and a $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal with an initial transmission of 82%, which it can match the requirement of micro pulse lidar. The measured CW output power and pulse repetitive frequency were consistent with the results of theoretic calculation well.

Key words diode pumped, passively Q-switched, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, micro pulse lidar

1 引言

激光雷达是测量对流层气溶胶和云底高度的最佳设备。研制人眼安全、小型、无人操作的微脉冲激光雷达已引起国际上的高度重视。微脉冲激光雷达一般要求激光器的重复频率在 4 kHz 以下, 脉冲能量在 20 μJ 左右。目前国外已有的微脉冲激光雷达采用 LD 抽运、声光调 Q 的 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 激光器, 价格相对昂贵。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为被动调 Q 晶体, 由于其在 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的基波(1.06 μm) 处有高的吸收截面和低的饱和强度, 近几年被广泛使用^[1,2]。同时, 被动调 Q 设计简单, 不需要调 Q 电源, 可以研制成小型、低成本的脉冲激光器。但是, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器的重复频率和抽运功率接近正比, 而过高的

重复频率无法使用在激光雷达系统上。本文针对微脉冲激光雷达的要求, 研究 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的、激光二极管抽运的小型 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器。进行了不同参数下的激光输出特性实验, 并分析了实验和理论计算。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。LD 是 Opto Power 公司的 SCT100-808-M2-01 连续输出激光器, 最大输出功率为 1.6 W@1.8 A, 光谱带宽为 2 nm, 发射面为 $100 \times 1 \mu\text{m}^2$ 。LD 光束被焦距为 3 mm 的棒透镜和焦距为 30 mm 的柱面透镜准直后, 通过一个焦距为 18 mm 的透镜聚焦进 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 棒中。LD 的输出功

收稿日期: 2001-03-02; 收到修改稿日期: 2001-05-10

作者简介: 陈卫标(1969—), 男, 上海人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士, 主要从事激光遥感研究。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

率控制在 1.4 W, 经过耦合光学部件后为 1.15 W, 耦合效率约 90%。直径为 3 mm, 长度为 5 mm 的 Nd:YAG 晶体的一个端面镀 1.06 μm 高反膜和 808 nm 增透膜, 并作为谐振腔的一个端镜; 另一端面镀 1.06 μm, 0.532 μm 增透膜。本实验中, 凹面反射镜 (M) 作为输出镜, 三组不同的参数组成以下三个不同谐振腔:

谐振腔 1: M 的 1.06 μm 反射率为 98%, 曲率半径为 300 mm, 腔长 28 mm;

谐振腔 2: M 的 1.06 μm 反射率为 95%, 曲率半径为 500 mm, 腔长 28 mm;

谐振腔 3: M 镀 1.06 μm 全反射膜, 0.532 μm 增透膜, 曲率半径为 400 mm, 腔长 45 mm。

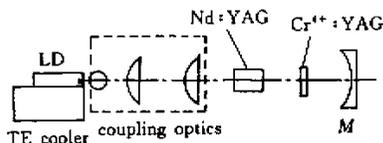


图 1 LD 抽运的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器原理图

Fig. 1 Setup of diode pumped, Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched Nd:YAG laser

Cr⁴⁺:YAG 饱和吸收晶体被插在尽可能靠近输出镜的谐振腔内。本文中采用透过率分别为 92%, 88%, 82%, 厚度均小于 1 mm 的 3 块 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 器件, 比较其在不同谐振腔内的激光输出特性。

3 实验结果和分析

在谐振腔 1 设置下, 使用不同透射率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体的输出结果见表 1。可以看出, 使用 92% 的 Cr⁴⁺:YAG, 激光器的重复频率高达 16 kHz。虽然, 使用 88% 和 82% 的 Cr⁴⁺:YAG, 重复频率均低于 4 kHz, 但是激光的脉冲能量只在 10 μJ 左右, 因此均无法满足微脉冲激光雷达的要求。同时, 随着 Cr⁴⁺:YAG 透射率的减小, 激光的重复频率降低, 脉冲宽度相应变窄。

在谐振腔 2 设置下, 激光的输出特性与谐振腔 1 时基本一致, 但是脉冲输出功率比谐振腔 1 的要大。当腔内无 Cr⁴⁺:YAG 时, 激光的连续输出功率和抽

运功率的关系见图 2 中方形点线; 此时的阈值功率为 0.15 W, 斜率效率为 33%。当采用 82% 透射率的 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 后, 抽运功率小于 0.95 W 时, 激光输出功率非常不稳定, 很难估计其真正的阈值。平均输出功率与抽运功率的关系如图 2 中的圆形点线所示, 斜率效率估计约为 21%。图 2 中的直线是观测数据的线性拟合。图 3 为此时的激光输出脉冲波形, 宽度为 14 ns, 这与在谐振腔 1 下获得的脉冲宽度一样。激光脉冲能量和脉冲重复频率随 LD 输入功率的变化见图 4 所示。可以看出, 采用透射率为 82% 的 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 激光的脉冲能量在 20 μJ 左右, 重复频率在 3 kHz 以下, 因此可满足微脉冲激光雷达的要求。图 4 也显示了采用 88% 透射率的 Cr⁴⁺:YAG 的输出结果 (圆点线)。最高重复频率略大于 4 kHz, 但输出能量 (15 μJ) 比光雷达的要求偏小。图 4 结果表明, 脉冲能量和宽度随抽运功率的变化很小, 脉冲重复频率则随抽运功率成正比, 这与文献 [3] 的结果一致。

表 1 谐振腔 1 中, 采用不同透射率的 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 的输出结果

Table 1 Outputs of laser under different transmission of Cr⁴⁺:YAG crystals in cavity 1

Initial Transmission of Cr ⁴⁺ :YAG	Output average power/mW	PRF /kHz	Pulse width /ns
92%	87	16	20
88%	37	3.8	18
82%	35	3.1	14

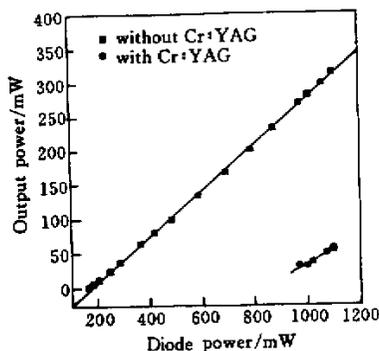


图 2 谐振腔 2 中激光输出功率随 LD 抽运功率的变化
Fig. 2 Changes of output power of laser with LD input power in cavity 2

大气气溶胶的后向散射强度与激光波长成反比, 因此选用倍频 Nd:YAG 波长, 可获得更强的气

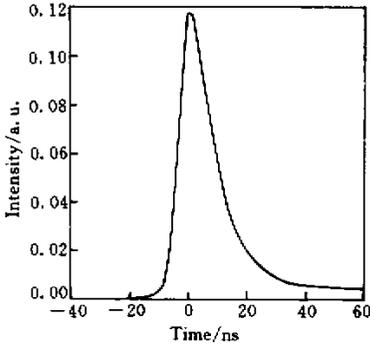


图 3 谐振腔 2 中,采用 82%透射率 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 时获得的激光脉冲波形

Fig. 3 Laser pulse Q-switched by Cr⁴⁺:YAG with a transmission of 82%

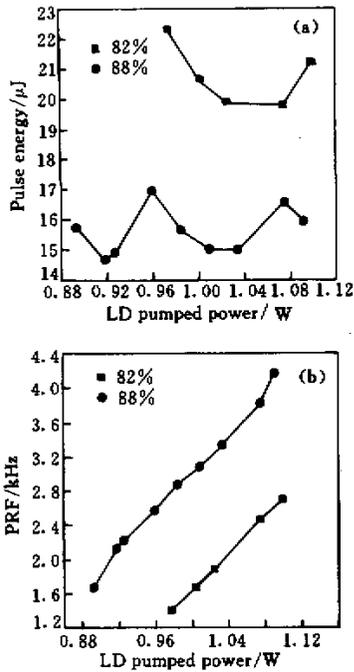


图 4 使用不同透射率的 Cr⁴⁺:YAG,激光脉冲能量(a)和重复频率(b)随 LD 抽运功率的变化

Fig. 4 Laser pulse energy (a) and PRF (b) versus LD pumped power using different transmissions of Cr⁴⁺:YAG

溶胶后向散射系数。采用谐振腔 3 的设置,进行了被动调 Q,腔内倍频实验。大小为 3 mm×3 mm×5 mm 的 KTP 晶体作为腔内倍频器件,调 Q 仍由

Cr⁴⁺:YAG 完成。在抽运功率 1.1 W 的情况下,只有采用透射率为 92%的 Cr⁴⁺:YAG 才有脉冲激光输出,绿光的脉冲能量为 9 μJ,重复频率为 4.3 kHz。因此目前的实验结果还不能满足微脉冲激光雷达的需求,提高抽运功率和优化激光器的设置可进一步提高输出能量。

根据 Degnan 等提出的被动调 Q 激光器的优化模型^[4],利用文献中和本文的实验参数,检验激光输出特性。连续 LD 抽运的连续激光输出功率可表达为

$$P_{cw} = \frac{I_s A}{2} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{P_{pump}}{P_t} - 1\right) \quad (1)$$

其中, I_s 为 Nd:YAG 棒中的饱和强度, $I_s = h\nu/\sigma\tau_a f_a$, $h\nu$ 为激光光子能量。连续激光在 Nd:YAG 中有效光束面积可由平凹谐振腔的计算获得,在谐振腔 2 中, $A = 0.06 \text{ mm}^2$ 。Nd:YAG 的参数选用参考文献^[5]中的数据,式中其他参数和含义见表 2。当抽运功率 P_{pump} 为 1100 mW 时,如采用实验阈值功率 P_t (150 mW,图 2),则计算得到连续输出功率为 303 mW,这与实验结果 313 mW 非常吻合。

表 2 LD 抽运的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 激光器理论计算参数

Table 2 Parameters of theoretic calculations for LD pumped, Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched laser

Parameter	Unit	Value
Stimulated emission cross-section	σ / cm^2	6.5×10^{-19}
Upper-state lifetime of Nd:YAG	$\tau_a / \mu\text{s}$	230
Gain media length	l / mm	5
Absorption efficient of Nd:YAG at 808 nm	a_p / cm^{-1}	4.5
Reflectivity of output mirror	R	0.95
Pump quantum efficiency	η_p	0.95
Initial transmission of Cr ⁴⁺ :YAG	T	0.82
Fractional Boltzmann population of upper laser level	f_a	0.41
Dissipative loss	L	0.02

采用饱和晶体作被动调 Q,激光器输出脉冲的时间间隔 τ_c 可表示为^[4]

$$\tau_c = \tau_a \ln\left(\frac{1 - \delta\psi}{1 - \psi}\right),$$

$$\psi = \frac{2 \ln\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}{2\sigma n_{cw} l} \quad (2)$$

其中, δ 为残留在腔内的反转粒子数与下次调 Q 前粒子数的比值,其值可通过实验获得,根据图 4 的结

果选择两个不同抽运功率时获得的不同脉冲重复频率,采用 82% 透射率 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 所对应的 δ 为 0.4。 n_{CW} 为连续的反转粒子数密度,其大小正比于抽运功率、抽运光和激光的模式重叠。根据参考文献[4]中的附录 B, $2\sigma n_{\text{CW}}l$ 可近似表达为

$$2\sigma n_{\text{CW}}l \approx \frac{2\sigma l f_a \tau_a \eta_p}{h\nu_p} P_p [1 - \exp(-\alpha_p l)] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{A_p}\right) \right] \quad (3)$$

从(2)式看出,脉冲重复频率与激光往返增益 $2\sigma n_{\text{CW}}l$ 成正比。因此,适当减小抽运光在 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 中的光束面积 A_p ,可以降低脉冲重复频率。抽运光面积可通过 CCD 来测量,在本实验中,抽运光聚焦点的大小测得为 $140 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ 。利用表 2 中的其他参数,代入公式(2),(3),采用透射率为 82% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$,激光的重复频率为 2.95 kHz,与实验结果 2.8 kHz 较吻合,表明实验参数设置基本合理。

上面的分析仅仅粗略估计激光的输出特性,有些参数,如往返增益 $2\sigma n_{\text{CW}}l$, δ 和脉冲状态下的有效光束面积 A 都很难精确测量或计算。在实际研制 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 连续 LD 抽运激光器时,脉冲重复频率也很难根据理论精确控制。但是,根据重复频率优化条件,合理选择器件参数,是可以兼顾输出功率和重复频率的。

4 结 论

本文研究的 LD 抽运, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的

小型激光器,在抽运功率为 1.1 W,采用透射率为 82% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q,脉冲输出能量为 20 μJ ,重复频率为 2.8 kHz,可满足微脉冲激光雷达测量对流层气溶胶和云底高度的要求。比较了实验结果与理论计算,连续输出功率与脉冲重复频率均与理论较吻合。进一步优化实验参数,提高抽运光与激光的模式重叠,可以提高激光输出效率。本文实验表明,这种小型、低成本的激光器在激光雷达中具有较大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kallisky. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as passive Q-switch and Brewster plate in a $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10):1738~1741
- 2 Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar *et al.*. Repetitive Q-switching of a CW $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable absorber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2):305~310
- 3 J. A. Morris, C. R. Pollock. Passive Q-switching of a diode pumped $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser with a saturable absorber [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**:440~442
- 4 J. J. Degnan. Optimization of passively Q-switched laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1890~1901
- 5 W. Koechner. Solid-state Laser Engineering [M]. 5th ed. Berlin Germany: Springer-Verlag, 1999. Chap. 2