

LD 泵浦 Nd:YVO₄/KTP 内腔倍频声光调 Q 理论和实验研究*

赵宏明 赵圣之 杨克建 李桂秋

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

摘 要 给出了 Nd:YVO₄/KTP 内腔倍频声光调 Q 工作原理的耦合波速率方程组. 实现了半导体激光器(LD)抽运折叠腔倍频声光调 Q 绿激光的运转, 在抽运光功率 3.8 W、重复频率 10 kHz 时, 获得绿光脉冲宽度为 33.2 ns, 单脉冲能量为 59.6 μJ, 峰值功率达到 1.8 kW. 数值求解耦合波方程组理论值与实验结果相符.

关键词 半导体二极管泵浦; Nd:YVO₄/KTP; 声光调 Q; 倍频; 数值解

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 激光二极管(LD)泵浦的全固化激光器(DPL)发展迅速, 而 LD 抽运的全固态绿光激光器更是引起人们的关注. DPL 的调 Q 器件具有高重复率、高平均功率和高转换效率等优点, 在激光通讯、遥感探测、军事、医学等领域有着广泛的应用前景.

Nd:YVO₄ 晶体由于具有大的发射截面、较宽的吸收截面, 非常适合做半导体激光器泵浦的激活介质^[1,2]; KTiOPO₄ (KTP) 具有高的非线性转换系数, 高的允许角和温度容限, 因而 Nd:YVO₄/KTP 容易获得高谐波转换效率, 被人们认为是全固态绿光激光器的比较理想的组合. Nd:YVO₄ 晶体的调 Q 方式从电光、声光 Q 开关主动调 Q 到饱和吸收体的被动调 Q 都有报道^[3,4], 但在声光主动调 Q 理论与实验相结合的研究还未见报道.

本文从理论和实验方面对 LD 泵浦、Nd:YVO₄/KTP 晶体折叠腔倍频声光主动调 Q 绿激光特性进行了研究. 给出了描述内腔倍频声光调 Q 工作原理的耦合波方程组, 数值求解该方程组所得的理论值与实验中测量的主动调 Q 输出绿激光脉冲宽度及单脉冲能量、峰值功率值相符.

1 理论分析

1.1 热效应产生的损耗

在引入速率方程前, 我们先分析一下热效应的影响. 由于在激活介质内温度场分布的不均匀, 导致光通过激活介质的相位差的不均匀, 该相位差以

抛物线型分布, 这样使激活介质产生了一个薄透镜效应, 其焦距为^[5]: $f_T = \frac{2\pi K_c}{\frac{dn}{dt} + \alpha_T n} \frac{\bar{\omega}_p}{\zeta P_{in} \eta}$, 其中对于 α 切割的 Nd:YVO₄ 晶体, $K_c = 5.23 \times 10^{-3} \text{ Wmm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\frac{dn}{dt} = 3 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_T = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\zeta = 0.24$.

由象差的衍射理论可知, 热效应引起的衍射损耗为^[5]

$$\delta_T = 1 - \left| \frac{\int_0^{r_b} \exp [i\Delta\varphi(r)] \exp (-2r^2/\omega_1^2) r dr}{\int_0^{r_b} \exp (-2r^2/\omega_1^2) r dr} \right| \quad (1)$$

式中 Δφ(r) 为晶体中心到边缘的剩余相差, 即

$$\Delta\varphi(r) = \frac{P_{in} \eta \left(\frac{dn}{dt} + \alpha_T n \right)}{2k_c \lambda} \cdot \begin{cases} 1 + \ln(r_b^2/\bar{\omega}_p^2) & (r^2 \leq \bar{\omega}_p^2) \\ r^2/\bar{\omega}_p^2 + \ln(r_b^2/r^2) & (r^2 \geq \bar{\omega}_p^2) \end{cases} \quad (2)$$

$\eta = 1 - e^{-\alpha l}$, α 为 Nd:YVO₄ 晶体的吸收系数, l 为 Nd:YVO₄ 晶体的长度, P_{in} 为抽运光功率, r_b 为晶体的有效半径尺寸, ω₁ 是激光的模式半径, $\bar{\omega}_p$ 为有效平均泵浦半径. 若所分析的谐振腔为折叠腔, 由于前端镜与晶体很近可以忽略其距离, 传输矩阵表示

$$\text{为: } T = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/R_1 & 1 \end{bmatrix}$$

L₁、L₂ 分别表示前端镜与输出镜的距离、输出镜与后端镜的距离, R₁、R₂ 分别为折叠腔的前端镜和输出镜的曲率半径, 根据实验值, 取 L₁ = 23.1 cm、L₂ = 7 cm, 由 ABCD 理论, 可以求出 ω₁, 最后得到热效

*山东省科技发展计划(013060102)和教育部博士点基金资助
Tel: 0531-8361736 Email: mingwellcome@eyou.com
收稿日期: 2003-09-26

应引起的损耗与抽运功率的关系如图 1,可以看出随抽运功率的增大,由热效应带来的损耗越来越大.

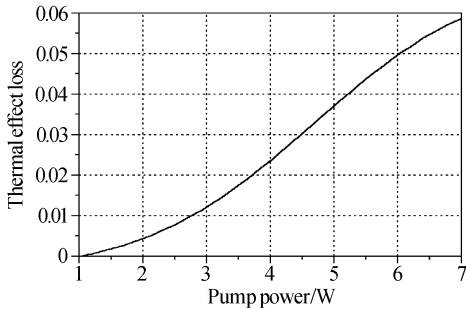


图 1 热效应损耗与抽运功率的关系

Fig. 1 Thermal effect loss versus pumping power

1.2 谐波转换的非线性损耗

在引用速率方程处理调 Q 脉冲特性时,二次谐波转换可被认为是基频光的损耗. 在平面波和小信号的近似下,二次谐波输出在 II 型相位匹配下近似表示为^[6]

$$P_{2\omega} = \frac{1}{4} \xi K_N A l_k^2 (\hbar \omega c)^2 \phi^2 \quad (3)$$

其中 $K_N = \frac{\omega^2 d_{\text{eff}}^2}{c^3 \varepsilon_0 n_c^2 n_c^\omega n_o^\omega}$, ϕ 是腔内的平均光子密度, ξ 是谐振腔的耦合系数, l_k 是 KTP 的长度, ω 是基频光的角频率, d_{eff} 是有效的非线性系数, c 是真空中光速, ε_0 介电常数, $n_c^{2\omega}$, n_c^ω , n_o^ω 是谐波和基频波的折射率, $A = \pi \omega_l^2 / 2$ 是基频光的面积. 根据腔内的光子密度与基频光功率的关系 $P_\omega = A \hbar \omega c \phi / 2$, 其中 $\hbar \omega$ 是基频光的单光子能量, 由于谐波转换而产生的损耗可以表示为

$$\delta_N = \frac{P_{2\omega} t_r}{\hbar \omega \phi A L_c} = \frac{K_N}{2} \hbar \omega c l_k^2 \phi \quad (4)$$

$P_{2\omega}$ 为倍频光输出功率, t_r 是腔内的往返时间, KTP 的 II 型相位匹配相应的参数在表 1 中列出.

表 1 KTP 二次相位匹配的相关参数

$n_o^\omega = 1.83$	$n_c^\omega = 1.746$	$n_c^{2\omega} = 1.79$	$d_{\text{eff}} = 7.2$ pm/V	$\varepsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12}$
---------------------	----------------------	------------------------	-----------------------------	---

(数据由山东大学晶体所提供)

1.3 速率方程及理论分析

假设在整个横截面积内泵浦光和腔内光子数密度是均匀分布, 可用平面波近似的速率方程来描述 Nd:YVO₄/KTP 激光器的主动调 Q 运转过程, 其速率方程为^[7,8]

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} [2\sigma(n_a - n_b)l - \delta_N - \delta_T - L] + \frac{\Omega}{4\pi} \frac{n_a}{\tau_a} \quad (5)$$

$$\left(\frac{dn_a}{dt}\right) = f_a R_{\text{in}} - f_a c \sigma \phi (n_a - n_b) - (n_a / \tau_a) \quad (6)$$

$$\left(\frac{dn_b}{dt}\right) = f_b c \sigma \phi (n_a - n_b) - (n_b / \tau_b) \quad (7)$$

式中, 泵浦速率 $R_{\text{in}} = P_{\text{in}} \eta / h\nu_p \pi \omega_p^2 l$, $h\nu_p$ 为泵浦光的光子能量; 腔内的往返时间 $t_r = [2n_1 l + 2n_2 d + 2n_3 l_k +$

$2(L_c - l - d - l_k)] / c$; n_1 , n_2 , n_3 分别是 Nd:YVO₄ 晶体、声光调 Q 晶体、KTP 晶体的折射率, L_c 为谐振腔的腔长. σ 是激活介质的受激发射截面, Ω 为自发辐射立体角, n_a , n_b 分别为激光晶体激发态的上、下能级粒子数密度, f_a , f_b 分别是激光晶体激发态上、下能级粒子数的玻尔兹曼分布系数, τ_a , τ_b 分别是激光晶体激发态上、下能级粒子数寿命, L 是腔内的本征损耗.

为了处理方便, 忽略声光调 Q 开关的上升和下降时间, 将其视为快开关, 即谐振腔的 Q 值是突变的. 考虑普遍情况, Q 开关关闭期间激活介质上能级积累的粒子数密度随时间的变化关系可以表示为

$$\frac{dn_a}{dt} = f_a R_{\text{in}} - \frac{n_a}{\tau_a} \quad (8)$$

求解得到调制频率为 f_p 的一个周期内激光晶体激发态上能级所积累的粒子数密度为

$$n_{a0} = f_a R_{\text{in}} \tau_a (1 - e^{-\frac{1}{\tau_p \tau_a}}) \quad (9)$$

利用式(1)~(9)及表 2 中给出的数据, 采用特殊步长方法数值求解, 我们可从理论上模拟声光主动调 Q、Nd:YVO₄/KTP 输出绿光激光的脉冲特性. 如图 2~4 中的线分别表示在不同的声光调制频率下的脉冲宽度、单脉冲能量、峰值功率与抽运功率的理论模拟的计算结果. 在 3.8 W 抽运光功率, 声光调制频率为 10 kHz 时, 理论上得到了 35.7 ns 的脉冲宽度, 单脉冲能量为 62 μJ , 峰值功率为 1.81 kW; 理论得到的脉冲波形如图 5 中的虚线所示.

表 2 方程组(1)~(9)的相关参数

$n_a(t=0)$	$n_{a0} = f_a R_{\text{in}} \tau_a (1 - e^{-\frac{1}{\tau_p \tau_a}})$		
σ	$2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	n_1	2.183
τ_a	98 μs	n_2	1.6
τ_b	300 μs	n_3	1.83
f_a	0.43	l_k	0.7 cm
f_b	0.23	l	0.5 cm
ω_l	394 μm	ω_p	0.33 mm
ξ	0.85	L	0.01
$\Omega/4\pi$	10^{-6}	α	5.32 cm^{-1}

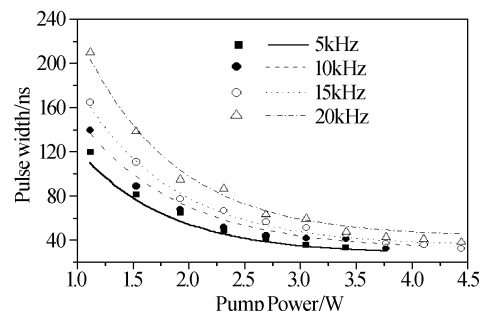


图 2 脉冲宽度在不同的调制频率下与抽运功率的关系
Fig. 2 Pulse width versus pumping power for different pulse repetition rates

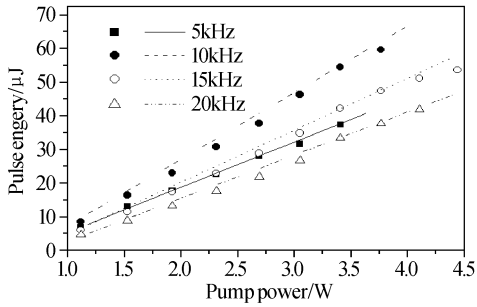


图3 单脉冲能量在不同的调制频率下与抽运功率的关系
Fig. 3 Single-pulse energy versus pumping power for different pulse repetition rates

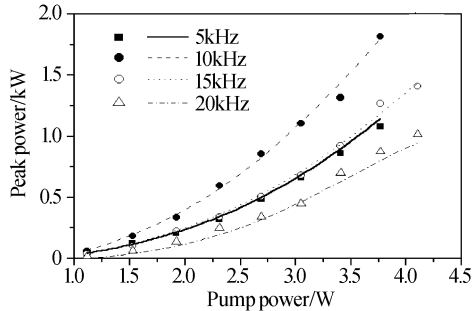


图4 峰值功率在不同的调制频率下与抽运功率的关系
Fig. 4 Pulse peak power versus pumping power for different pulse repetition rates

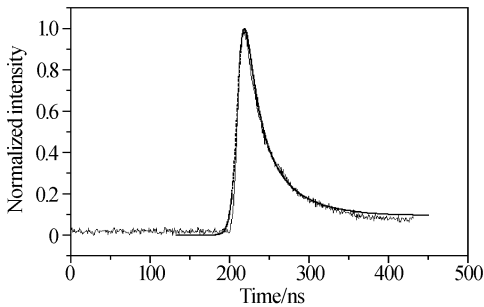


图5 调制重复率为10 kHz, 实验中观察到的脉冲波形(实线)与理论结果(虚线)

Fig. 5 Temporal profile of single-pulse at the repetition rate of 10 kHz and Solid line, oscilloscope trace; dashed line, calculated result

2 实验

2.1 实验装置

实验采用的三镜折叠腔结构如图6所示. 泵浦激光器选用带光纤耦合的半导体激光器(FAP-I system Coherent Inc. USA.). 腔镜 M_1 的曲率半径为150 mm, 镀808 nm的高透膜, 1064 nm、532 nm的高反膜. 激光工作物质是 $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$ 掺杂浓度为1.0%的Nd:YVO₄晶体, 晶体一端镀808 nm增透膜, 另一端镀1064 nm高透膜, 实验中将其旋转45°. 折叠镜 M_3 兼作绿光输出镜, 曲率半径为100 mm. KTP晶体按II型相位匹配角切割(山东大学晶体所生长), 尺寸为 $3 \times 3 \times 7 \text{ mm}^3$, 通光面均镀1064 nm、532 nm增透膜. Nd:YVO₄晶体和KTP晶体均采用水循环和温控半导体致冷片致冷, 温度分别控制在

20°C、22°C. M_2 为平面全反镜, 表面镀1064 nm、532 nm高反膜. 实验装置中采用的滤片是将输出绿光中掺杂的1.06 μm的泵浦光过滤掉. 实验中采用了QSGSU-6/Q型声光调Q开关(中国电子科技第二十六研究所), 作用长度为24 mm, 两端镀1064 nm增透膜, 衍射损耗为85%, 声光靠近Nd:YVO₄晶体放置. 最后选用LPE-1B型功率计(中科院物理研究所)接受输出激光功率和TED620B示波器(Tektronix Inc. U. S. A)测量绿激光脉宽.

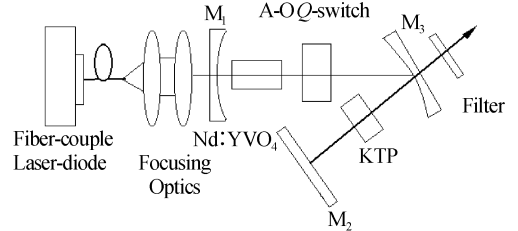


图6 实验装置图

Fig. 6 Schematic of the experimental setup

2.2 实验结果及分析

在一定的泵浦功率下, 使Nd:YVO₄/KTP激光器输出稳定的绿激光, 插入声光调制器, 得到了Q开关绿激光运转, 平均输出功率如图7所示. 改变调Q重复频率, 测量了绿激光的平均输出功率、脉冲宽度、单脉冲能量及峰值功率与泵浦功率的变化关系, 如图2~4中的点所示. 图示表明对于相同的调Q重复频率, 随着泵浦功率的增加, 平均输出功率增大, 脉宽不断减少; 在相同抽运光功率下, 当重复率高于10 kHz时, 调Q重复率增加, 单脉冲能量和峰值功率随之减少. 注入抽运光功率为3.8 W时, 重复频率为20 kHz, 实验获得平均功率为755 mW的绿激光的输出, 光-光转换效率达到20%, 输出绿激光的脉冲宽度为33 ns; 在重复频率为10 kHz时, 我们获得脉冲宽度为33.2 ns, 单脉冲能量和峰值功率分别为59.6 μJ、18.1 kW, 观察到的脉冲波形如图5中实线所示, 可以看出理论模拟结果与实验结果吻合的比较好.

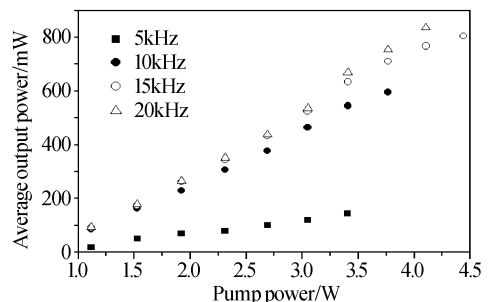


图7 平均输出功率在不同的调Q频率下与抽运功率的关系

Fig. 7 Average output power versus pumping power for different pulse repetition rates

3 讨论

影响激光单脉冲峰值功率的因素很多,但主要的是以 Q 开关关闭期间所积累的上能级粒子数多少,因此与激光晶体 Nd:YVO₄ 的上能级寿命 τ_a 有直接关系. 当调制脉冲间隔周期接近 Nd:YVO₄ 晶体上能级寿命时, (此时对应的重复频率约为 10 kHz), Q 开关关闭期间所积累的上能级粒子数达到最大值,在声光调制电压不变情况下,输出单脉冲能量最大,相应峰值功率高;调制频率小于 10 kHz,由于自发辐射,导致了反转粒子数的减少,输出脉冲能量和峰值功率下降;当声光调 Q 频率高于 10 kHz 时,相同抽运功率下,输出脉冲能量和峰值功率仅与调制重复频率有关. 可以看出分析与图 3、4 中所示的实验结果一致.

参考文献

- 1 Afields R, Birnbaum M, Fincher C L. Highly efficient Nd:YVO₄ diode-laser end-pumped laser. *Appl Phys Lett*, 1987, **51**(23):1885 ~ 1886
- 2 Zayhowski J J, Dill C. Coupled-cavity electro-optically Q -switched Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt Lett*, 1995, **20**(7): 716 ~ 718

- 3 Zheng J, Zhao S, Chen L. Laser-diode end-pumped passively Q -switched intracavity doubling Nd:YVO₄/KTP laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber. *Opt Eng*, 2002, **41**(8): 1970 ~ 1975
- 4 李健, 卢兴强, 侯玮, 等. 大功率 LD 抽运 Nd:YVO₄/KTP 声光调 Q 绿光激光器. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1066
Li J, Lu X Q, Hou W, et al. *Chinese J Lasers*, 2000, **A27**(12): 1063 ~ 1066
- 5 Zheng J A, Zhao S Z, Chen L. Influence of thermal effect in gain media on optimum design of LD end-pumped solid-state laser. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6): 724 ~ 729
- 6 Zheng J A, Zhao S Z, Chen L. Influences of thermal effect on KTP II-type phase matching second harmonics generation. *Opt Commun*, 2001, **199**: 207 ~ 214
- 7 Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, et al. Optimization of Cr⁴⁺-doped saturable-absorber Q -switched lasers. *IEEE J Quantum Electronics*, 1997, **33**(12): 2286 ~ 2294
- 8 Liu J, Wang C Q, Du C L, et al. High-power actively Q -switched Nd:GdVO₄ laser end-pumped by a fiber-coupled diode-laser array. *Opt Commun*, 2001, **188**: 155 ~ 162

Q -switched Intracavity Doubling Nd:YVO₄/KTP Laser with Acousto-optic

Zhao Hongming, Zhao Shengzhi, Yang Kejian, Li Guiqiu

Received date: 2003-09-26

Abstract The coupled rate equations of intracavity-frequency-doubling Nd:YVO₄/KTP Q -switched with acousto-optic-modulator laser is given to simulate the process of laser. Laser-diode-pumped folded Nd:YVO₄/KTP Q -switched with acousto-optic-modulator laser is realized. When the incident power is 3.76 W and the pulse repetition rate is 10 kHz, a pulse width of 33.2 ns, single-pulse energy of 59.6 μ J and peak power of 1.81 kW have been obtained. The experimental results agree with the numerical solutions of the coupled rate equations.

Keywords LD-pumped; Nd:YVO₄/KTP; Frequency-doubling; Numerical solution



Zhao Hongming was born in October, 1979, in Yantai, Shandong Province. Now he pursues his M. D. in Information Science & Engineering School of Shandong University. His current research interest is laser technology and nonlinear optics.