

# 激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体间歇振荡双波长激光器

范秀伟<sup>1</sup> 何京良<sup>1,2</sup> 黄海涛<sup>1</sup> 薛林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014; <sup>2</sup> 山东大学晶体材料研究所, 山东 济南 250100)

**摘要** 报道了激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 晶体间歇振荡 1064 nm 和 1319 nm 双波长激光器。采用间歇振荡技术,可有效地控制上能级的反转粒子数,避免激光振荡谱线之间的双波长竞争效应,而且对输出镜镀膜精度的要求大大降低,稳定的间歇振荡双波长激光输出较容易获得。两声光间的延迟时间连续可调,因此可以通过调节延迟时间来改变双波长激光的输出功率之比。在抽运电流为 22 A,声光重复频率为 4 kHz,延迟时间为 10  $\mu$ s 时获得 1319 nm 激光偏振输出功率 6.2 W,1064 nm 激光偏振输出功率 5.1 W。根据间歇振荡双波长激光器的四能级速率方程模型进行了数值计算和分析,理论结果与实验相符。

**关键词** 激光器; 双波长; 间歇振荡; 激光二极管侧面抽运; Nd:YAG 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

## An Intermittent Oscillation Dual-Wavelength Diode Pumped Nd:YAG Laser

Fan Xiuwei<sup>1</sup> He Jingliang<sup>1,2</sup> Huang Haitao<sup>1</sup> Xue Lin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Ji'nan, Shandong 250014, China)  
(<sup>2</sup> National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)

**Abstract** A dual-wavelength diode side-pumped Nd:YAG laser is generating intermittent laser action at the wavelengths of 1064 nm and 1319 nm was demonstrated. By this means, the population inversion is distributed efficiently, mode competition of both laser lines can be avoided, the effect resulted from the accuracy of the coating process can be reduced and the stable output of dual-wavelength is easily obtained. Furthermore, under different operation conditions, the ratio of the output powers can be controlled by changing the delay time. For the input current 22 A, the pulse repetition rate 4 kHz and the delay time 10  $\mu$ s, the output powers are 6.2 W for 1319 nm and 5.1 W for 1064 nm, respectively. The numerical simulation of the performance of the dual-wavelength laser has been considered basing on the rate equations of intermittent oscillation dual-wavelength laser and the theoretical analysis corresponds to the experimental result.

**Key words** lasers; dual-wavelength; intermittent oscillation; diode-side-pumped; Nd:YAG crystal

## 1 引言

一块激光介质同时发射双波长或多波长的激光器在许多领域有着广泛的应用<sup>[1~4]</sup>,例如大气激光探测、原子和分子的多光子分步电离、医疗仪器等。目前研究的热点主要集中在通过非线性频率变换实现紧凑、高效的全固态红、绿、蓝、黄激光输出<sup>[5~7]</sup>。同时实现双波长激光输出已有多篇文献报道<sup>[8~12]</sup>。在这些激光器中发射的激光谱线拥有共同的激光上能级并且同时运转,共同分享存储在上能级的反转粒子数,因此模式竞争不可避免。为实现双波长运转,必

须对每个波长的输出耦合率进行优化以平衡双波长的增益和损耗。实验发现在双波长激光器中,各波长激光输出有明显的波动<sup>[10,11]</sup>。为解决这些问题,学者们提出了许多办法。在连续运转双波长激光器中采用三镜腔结构可以大大提高激光输出的稳定性<sup>[11]</sup>。在调 Q 运转激光器中,可根据激光发射谱线的受激发射截面和增益介质受激发射的偏振特性,调节两发射波长的腔长之比来平衡两波长的竞争能力和净增益<sup>[13,14]</sup>。即使如此,因为镀膜技术很难达到所要求的精度,获得稳定的双波长激光输出仍非常困难,而且

**基金项目:** 国家自然科学基金(60478009)和泰山学者资助课题。

**作者简介:** 范秀伟(1977—),男,山东人,博士研究生,主要从事全固态激光器件方面的研究。

E-mail: xwfansdnu@163.com

**导师简介:** 何京良(1957—),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事全固态激光技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: jlhe@sdu.edu.cn(通信联系人)

双波长激光输出的功率之比不可控制。

本文提出了一种间歇振荡技术,在实验上实现了双波长间歇振荡稳定激光输出,根据激光器的速率方程理论提出了间歇振荡的双波长激光器的四能级速率方程模型,并进行了数值计算和分析,所得结果与实验相符。

## 2 间歇振荡谐振腔

Nd:YAG 晶体是一种优良的激光晶体,对 808 nm 抽运光具有大的吸收系数,高的热传导系数,更重要的是它在 1.32  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$  两条跃迁谱线具有大的受激发射截面<sup>[15]</sup>,这非常有利于通过频率变换技术产生高视觉亮度和高光谱纯度的红绿蓝激光。因此我们选择 Nd:YAG 晶体作为激光

增益介质。

在实验中采用的谐振腔结构如图 1 所示。由一个共有腔和两个支腔组成的 Y 型谐振腔和一块 Nd:YAG 晶体实现 1319 nm ( $\lambda_1$ ) 和 1064 nm ( $\lambda_2$ ) 双波长间歇振荡。增益介质 Nd:YAG 晶体放在两波长的共有腔中,每一支腔分别采用一声光(AO)开关实现波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的调 Q 激光输出。 $M_1$  和  $M_2$  分别是波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  谐振腔的端镜, $M_3$  为一平面分束镜,将谐振腔分成两支腔,OC 为一平面输出镜,对波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的反射率分别为 89% 和 82%。在谐振腔的两支臂分别插入一布儒斯特片 BP<sub>1</sub> 和 BP<sub>2</sub> 可分别实现波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  偏振光输出。为获得 TEM<sub>00</sub> 基模输出可在图示位置插入两小孔光阑 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub>。

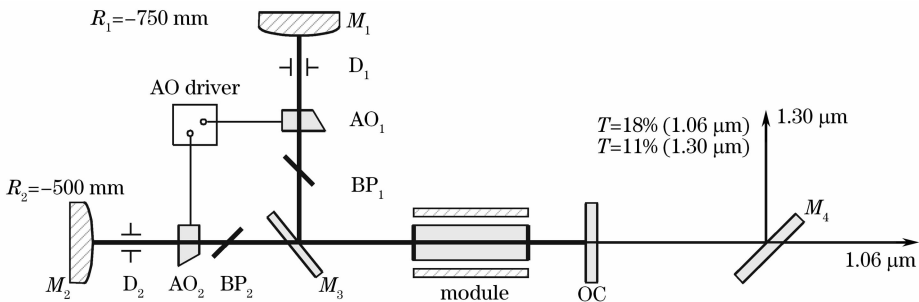


图 1 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体间歇振荡双波长激光器实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for intermittent oscillation dual-wavelength diode side-pumped solid-state laser

由声光开关原理可知,必须有脉冲调制的射频信号作用在声光晶体上。实验中,作用在两声光晶体中的射频信号具有相同的调制重复频率,该调制信号为 TTL 电平,但两信号间有一  $\Delta t$  的时间延迟,即声光 AO<sub>1</sub> 打开  $\Delta t$  时间后声光 AO<sub>2</sub> 再打开。设 Q 开关函数为一阶跃函数,则两 Q 开关函数关系可简要描述成图 2 所示关系。初始两声光关闭,两支腔都处于高损耗状态,两波长激光均不能起振,此时通过连续抽运,反转粒子在 Nd:YAG 晶体上能级得到积累。声光开关 AO<sub>1</sub> 首先打开,同时声光开关

AO<sub>2</sub> 仍处于关闭状态,因此波长  $\lambda_2$  的激光因损耗大被压制而不能起振,增益介质中积累的能量以波长  $\lambda_1$  的激光脉冲释放出来。接着两声光又都处于关闭状态,经过  $\Delta t$  的延迟时间,反转粒子数得到积累,声光开关 AO<sub>2</sub> 打开,同时声光开关 AO<sub>1</sub> 处于关闭状态,于是只有波长  $\lambda_2$  的激光可以振荡,消耗反转粒子数,得到波长  $\lambda_2$  的激光脉冲输出。换句话说,如果假定调制信号的周期是  $T$ ,那么用于波长  $\lambda_1$  振荡的抽运时间是  $T - \Delta t$ ,而用于波长  $\lambda_2$  振荡的抽运时间是  $\Delta t$ ,双波长激光输出是同频率间歇输出。采

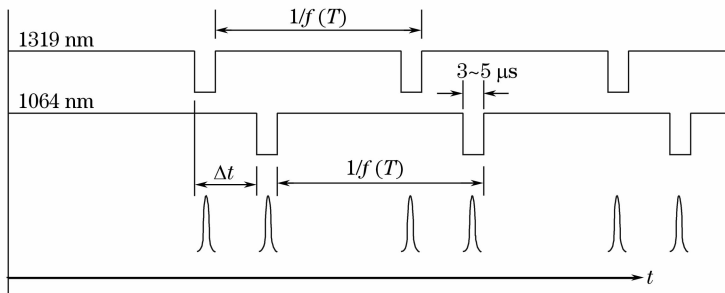


图 2 两声光 Q 函数的相对关系

Fig. 2 Relation of the two acousto-optic Q-switch functions

用该技术,受激反转粒子数得到有效分配,两振荡波长间的双波长竞争效应得以避免。更重要的是,在不同的振荡条件下,可以通过调节两声光间的延迟时间来控制双波长输出功率之比。

### 3 实验研究

在实验中,波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的谐振腔长度分别为 370 mm 和 368 mm,凸面镜  $M_1$  和  $M_2$  的曲率分别为  $-750$  mm 和  $-500$  mm。Nd:YAG 晶体棒长 60 mm,直径 4 mm,Nd 离子掺杂原子数分数为 0.6%。

当抽运电流为 19 A,声光重复频率为 4 kHz 时,波长 1319 nm 和 1064 nm 的平均输出功率随延迟时间的变化关系如图 3 所示。从图中可以看出,随着两声光间延迟时间的增大,1319 nm 激光的平均输出功率降低而 1064 nm 激光的平均输出功率增大。在最小延迟时间  $10 \mu\text{s}$  时,获得 1319 nm 平均输出功率 3.33 W,1064 nm 平均输出功率 2.55 W。在延迟时间大约  $30 \mu\text{s}$  时,双波长激光输出功率近似相等。

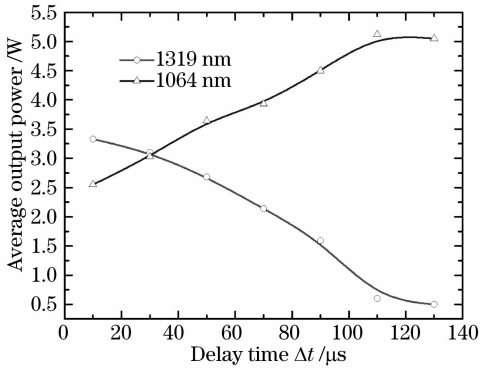


图 3 在抽运电流 19 A,声光重复频率 4 kHz 时,双波长平均输出功率相对于延迟时间  $\Delta t$  的变化关系

Fig.3 Dependences of the average output powers at 1064 nm and 1319 nm on the delay time  $\Delta t$  when the input current and the repetition rate are fixed at 19 A and 4 kHz

在声光重复频率为 4 kHz,测量了在最小延迟时间  $10 \mu\text{s}$  和最大延迟时间  $130 \mu\text{s}$  时,双波长输出功率随抽运电流的变化关系,结果如图 4 所示。双波长平均输出功率随抽运电流的增长而单调增长,延迟时间变大,1319 nm 波长阈值增大,而 1064 nm 波长阈值变化不大。在抽运电流 19 A,重复频率为 4 kHz,延迟时间  $30 \mu\text{s}$  时,测得波长 1319 nm 的脉冲宽度 260 ns,波长 1064 nm 的脉冲宽度为 90 ns。在大约 40 min 时间内测得 1319 nm 和 1064 nm 激光平均输出功率抖动分别为 3.6% 和 2.6%,脉冲

稳定度如图 5 所示。

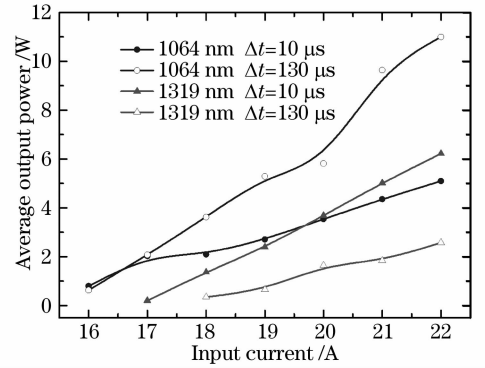


图 4 声光延迟时间分别为  $10 \mu\text{s}$  和  $130 \mu\text{s}$  时,双波长平均输出功率随抽运电流的变化关系

Fig.4 Dependences of the average output powers at 1064 nm and 1319 nm on the input current for  $10 \mu\text{s}$  and  $130 \mu\text{s}$  delay time, respectively

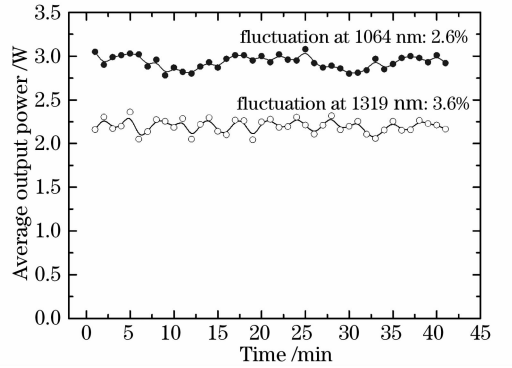


图 5 双波长输出稳定度

Fig.5 Pulse stability of dual-wavelength

### 4 理论分析

对于四能级系统,间歇振荡双波长激光器速率方程可写成<sup>[16,17]</sup>

$$\frac{dn}{dt} = W_p - cn(\sigma_1\phi_1 + \sigma_2\phi_2) - \frac{n}{\tau_f}, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = cn\sigma_1\phi_1 \frac{l}{L'_1} - \frac{\phi_1}{\tau_{r1}(t)} + \frac{n\gamma_1\beta_1}{\tau_{f1}}, \quad (2)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = cn\sigma_2\phi_2 \frac{l}{L'_2} - \frac{\phi_2}{\tau_{r2}(t)} + \frac{n\gamma_2\beta_2}{\tau_{f2}}, \quad (3)$$

其中  $W_p$  为单位体积抽运速率(单位:  $\text{m}^{-3}/\text{s}$ ),  $c$  是真空中光速,  $n$  为单位体积上能级反转粒子数密度(单位:  $\text{m}^{-3}$ ),  $\phi_1, \phi_2$  分别是指两个跃迁  $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$  和  $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$  产生的腔内光子数密度(单位:  $\text{m}^{-3}$ ),  $\sigma_1, \sigma_2$  分别为两个波长  $\lambda_1, \lambda_2$  的受激发射截面,  $\tau_f$  是增益介质上能级寿命,  $\tau_{f1}$  和  $\tau_{f2}$  分别对应两跃迁的上能级荧光寿命,  $l$  为增益介质长度,  $L'_1, L'_2$  为两波长的有效腔长,  $\tau_{r1}, \tau_{r2}$  为两种波长的腔光子寿命,  $\gamma_1, \gamma_2$

为自发辐射耦合到两种波长的比率,  $\beta_1, \beta_2$  为两种跃迁的荧光分支比。两波长有效腔长  $L'_1, L'_2$  可表示为

$$L'_i = L_i + (n_0 - 1)l, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中  $n_0$  是增益介质的折射率,  $L_i$  是对应波长的物理腔长。

设由 Q 开关产生的损耗为一阶跃函数  $\alpha_Q(t)$ , 其表达式为

$$\alpha_Q(t) = \begin{cases} 85\% & \left( t < 0 \text{ or } \frac{k-1}{f} \leq t < \frac{k}{f} - 3 \right), \\ 0 & \left( \frac{k}{f} - 3 \leq t < \frac{k}{f} \right), \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

其中  $f$  为重复频率,  $t$  的单位为  $\mu\text{s}$ 。因为两声光 AO<sub>1</sub> 和 AO<sub>2</sub> 之间有延迟时间, 因此延迟时间  $\Delta t$  对 Q 开关损耗产生的影响必须考虑。于是腔内光子寿命  $\tau_{r1}, \tau_{r2}$  可写成

$$\tau_{r1}(t) = \frac{-2L'_1}{c \ln\{(1 - T_1)(1 - \alpha_1)[1 - \alpha_{Q1}(t)]^2\}}, \quad (6)$$

$$\tau_{r2}(t) = \frac{-2L'_2}{c \ln\{(1 - T_2)(1 - \alpha_2)[1 - \alpha_{Q2}(t - \Delta t)]^2\}}, \quad (7)$$

其中  $\alpha_1, \alpha_2$  分别对应波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的腔内往返损耗, 例如衍射损耗, 杂质吸收散射损耗和镜面散射损耗等,  $T_1$  和  $T_2$  分别对应波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的输出耦合率。

对于激光二极管连续抽运固体激光器, 单位体积抽运速率  $W_p(t)$  可视为不随时间  $t$  变化的常量, 假定在整个有效抽运体积内抽运是均匀的, 那么  $W_p(t)$  可写成

$$W_p(t) = \eta \frac{P_m}{h\nu_p} \frac{1}{V_c}, \quad (8)$$

其中  $\eta$  为总的抽运效率,  $P_m$  为抽运功率,  $\nu_p$  为抽运光频率,  $V_c$  为有效抽运体积。

在固体激光器中晶体的热效应主要是热透镜效应和热致双折射, 其中热透镜效应直接影响谐振腔的稳定性和在晶体棒所能形成的最大基模半径, 激光晶体的热焦距可表示为<sup>[17]</sup>

$$f_{th} = \frac{\pi r_0^2 K_c}{\xi P_{abs}} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha_T C_{r,\phi} n_0^3 \right), \quad (9)$$

式中  $\xi$  是热载率,  $P_{abs}$  是激光晶体吸收的抽运光能量,  $K_c$  是激光晶体的热传导率,  $dn/dT$  是晶体热光系数,  $\alpha_T$  是晶体热膨胀系数,  $C_{r,\phi}$  分别对应激光晶体在径向和切向的光弹系数。

在数值模拟中用到的基本参量值为  $n_0 = 1.82$ ,  $\xi = 0.35$ ,  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $K_c = 13 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $\alpha_T = 7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\sigma_1 = 0.92 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_2 = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_f = 230 \mu\text{s}$ ,  $\beta_1 = 0.14$ ,  $\beta_2 = 0.6$ ,  $C_r = 0.017$ ,  $C_\phi = -0.0025$ 。将以上参量及实验参量带入速率方程进行数值模拟。在对应抽运电流 19 A, 声光重复频率 4 kHz 时, 数值模拟双波长平均输出功率与延迟时间的相对变化关系如图 6 所示, 显然理

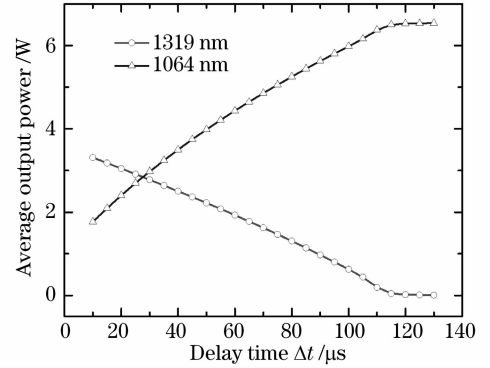
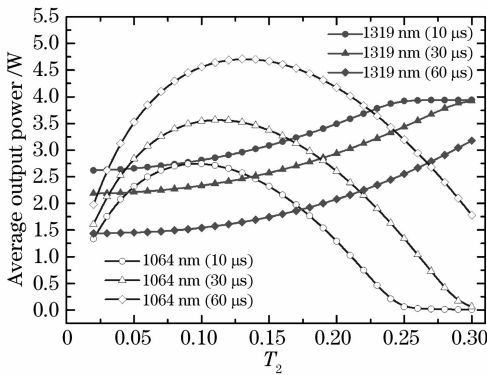


图 6 在重复频率 4 kHz,  $T_2 = 18\%$  时, 数值模拟双波长输出功率与延迟时间的相对关系

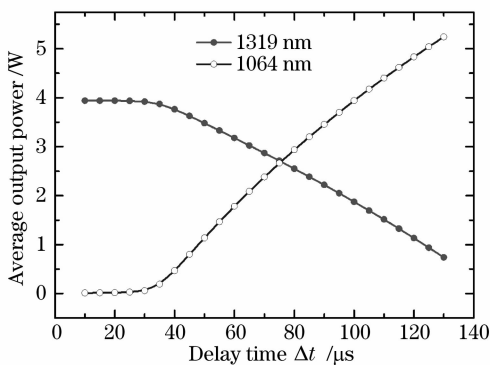
Fig. 6 Computed average output powers at dual-wavelength as a function of the delay time when repetition rate was 4 kHz and  $T_2 = 18\%$

论模拟与实验结果相符。图 7 是对应抽运电流 19 A, 声光重复频率 4 kHz, 波长  $\lambda_1$  的输出耦合率为 11%, 声光间延迟时间分别为 10  $\mu\text{s}$ , 30  $\mu\text{s}$ , 60  $\mu\text{s}$  时, 双波长输出功率与波长  $\lambda_2$  输出耦合率  $T_2$  的相对变化关系的理论模拟结果。从图 7 中可以看出随着  $T_2$  的增大, 波长  $\lambda_1$  的平均输出功率逐渐增大, 而波长  $\lambda_2$  的平均输出功率先增大, 然后减小, 即相对波长  $\lambda_2$  而言存在一最佳输出耦合率。这是因为随着波长  $\lambda_2$  的输出耦合率增大, 波长  $\lambda_2$  的振荡阈值增大, 波长  $\lambda_2$  的脉冲输出后增益介质剩余的反转粒子数较多, 使波长  $\lambda_1$  振荡时可利用的反转粒子数增多, 因此  $\lambda_1$  的平均输出功率增大。

将波长  $\lambda_2$  的输出耦合率设定为 30%, 对应抽运电流 19 A, 声光重复频率 4 kHz 时, 数值模拟双波

图7 双波长输出功率随  $T_2$  的变化关系Fig.7 Dependences of the average output powers at 1064 nm and 1319 nm on  $T_2$ 

长平均输出功率与延迟时间的相对变化关系如图8所示。与图6相比,随延迟时间的变化双波长平均输出功率变化趋势相同,在大约延迟时间  $70 \mu\text{s}$  时,双波长激光输出功率近似相等,相比  $T_2$  为 18% 时,延迟时间增大。分析表明,在给定腔参量和运转条件下,即使输出耦合镜镀膜没有达到所要求的准确度,仍然可以通过调节两声光间的延迟时间来获得合适的双波长平均输出功率之比。

图8 在重复频率 4 kHz,  $T_2 = 30\%$  时,数值模拟双波长输出功率与延迟时间的相对关系Fig.8 Computed average output powers at dual-wavelength as a function of the delay time when repetition rate was 4 kHz and  $T_2 = 30\%$ 

## 5 结 论

提出了一种间歇振荡技术来实现稳定的双波长基频间歇输出。该间歇振荡谐振腔采用一块激光晶体,两个声光开关实现双波长激光间歇振荡。因为两声光间的延迟时间连续可调,所以很容易获得稳定的间歇振荡双波长激光输出。在理论上建立了间歇振荡双波长激光器的四能级速率方程模型,并进行了数值模拟,理论模拟与实验结果相符。

## 参 考 文 献

- 1 Y. F. Chen, Y. S. Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched laser with intracavity sum frequency mixing in periodically poled KTP [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(2): 207~210
- 2 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, W. X. Lin *et al.*. Second harmonic generation and sum frequency mixing of dual wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> laser in flux grown KTiOPO<sub>4</sub> Crystal [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1): 48~50
- 3 Yung-Fu Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 397~399
- 4 H. Y. Shen, W. X. Lin, R. R. Zeng *et al.*. Second-harmonic generation and sum-frequency mixing of double-wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> Laser to 413.7-nm violet coherent radiation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(9): 4472~4473
- 5 Jingliang He, Jun Liao, Hui Liu *et al.*. Simultaneous cw red, yellow, and green light generation, "traffic signal lights", by frequency doubling and sum-frequency mixing in an aperiodically poled LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(2): 228~230
- 6 J. Liao, J. L. He, H. Liu *et al.*. Red, yellow, green and blue four-color light from a single, aperiodically poled LiTaO<sub>3</sub> crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3): 265~267
- 7 Jun Liao, Jingliang He, Hui Liu *et al.*. Simultaneous generation of red, green, and blue quasi-continuous-wave coherent radiation based on multiple quasi-phase-matched interactions from a single, aperiodically-poled LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(19): 3159~3161
- 8 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou *et al.*. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from  $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$  and  $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20): 1937~1938
- 9 H. Y. Shen, W. X. Lin, R. R. Zeng *et al.*. 1079.5- and 1341.4-nm; larger energy from a dual-wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> pulsed laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 5952~5957
- 10 J. L. He, J. Du, J. Sun *et al.*. High efficiency single- and dual-wavelength Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers pumped by a fiber-coupled diode [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(3): 301~304
- 11 Y. F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4): 475~478
- 12 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end pumped 1386 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 13 李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现 1386 nm 连续波激光输出 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 13 Wenxiong Lin, Hongyuan Shen. A configuration of the laser cavity for simultaneous dual wavelength Q-switched pulsed Nd:YAlO<sub>3</sub> laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(6): 2979~2982
- 14 Wenxiong Lin, Shouqun Lin, Jianhong Huang. Cavity configuration for a Q-switched simultaneous dual-wavelength Nd:YAlO<sub>3</sub> laser with the characteristic of polarization-dependent emission cross section [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(3): 479~483
- 15 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
- 16 张强,姚建铨,温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 16 George A. Henderson. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(11): 5451~5455
- 17 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 363~365