

# 150 kHz 生长型复合 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> 电光调 Q 激光器

刘 瑞 于永吉 陈薪羽 王 超 吴春婷 金光勇

(长春理工大学理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 报道了一种激光二极管(LD)端面抽运生长型复合晶体的 RTP 电光调 Q 激光器, 实现了最高重复频率 150 kHz 的 TEM<sub>00</sub> 模激光输出, 并且对比了生长型复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在高重复频率电光调 Q 激光器中的表现。实验表明在中小抽运功率下, 具有更大发射截面和适中上能级寿命的复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体更容易在高重复频率电光调 Q 运转下实现高功率的窄脉宽激光输出。在高抽运功率下, 相比于复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 热性能更加出色的复合 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体更适合作为高重复频率电光调 Q 运转的激光增益介质。

**关键词** 激光器; RTP 电光 Q 开关; 生长型复合体; 高重复频率; 激光二极管端面抽运

**中图分类号** 0436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0602001

## 150 kHz Q-Switched Adhesive-Free Bond Composite Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser

Liu Rui Yu Yongji Chen Xinyu Wang Chao  
Wu Chunting Jin Guangyong

(Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** A laser diode (LD) end-pumped RTP electro-optic (E-O) Q-switched adhesive-free bond composite crystal laser TEM<sub>00</sub> operating at repetition rate of 150 kHz is reported. Details are compared on performance of high repetition rates E-O Q-switched composite Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers. The experimental results reveal that under small and medium pump powers, the composite Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, compared with the composite Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal, has more capability to obtain higher peak power and shorter pulse width output through high repetition rates E-O Q-switched operation, for its larger stimulated emission cross-section and moderate upper-state lifetime. Compared with composite Nd:YVO<sub>4</sub> crystal, composite Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal with excellent thermal performance under high pump power is more suitable to be the laser gain medium for high repetition rates E-O Q-switched operation.

**Key words** lasers; RTP electro-optic Q-switching; adhesive-free bond composite crystal; high repetition rate; laser diode end-pump

**OCIS codes** 140.3538; 140.3540; 140.3580

## 1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运的全固态激光器具有较好的光束质量和较高的转换效率, 伴随着 LD 制备工艺及其抽运技术的日趋完善, 近年来得到了迅速的发展。在军事国防、激光通信、激光微精细加

工等领域的许多应用中, 都需要激光器以较高的重复频率输出高功率的窄脉冲, 这通常是靠激光器的调 Q 技术实现的<sup>[1~7]</sup>。属于主动调制的电光调 Q 具有开关速度快、脉冲宽度窄和消光比高等优点, 而且容易实现精确同步控制和稳定输出, 在应用中

收稿日期: 2012-02-06; 收到修改稿日期: 2012-02-29

基金项目: 吉林省科技支撑重点项目(2010PT, 20100355)资助课题。

作者简介: 刘 瑞(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: istanbul916@126.com

导师简介: 金光勇(1971—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: jgycom@163.com(通信联系人)

具有独特的优势。但是由于受到高压 Q 驱动源和电光材料性能、制备等因素的限制,使得电光调 Q 激光器的重复频率很难有所提高。近年来,随着 BBO、LGS 和 RTP 等新型电光晶体材料的出现,电光 Q 开关的重复频率得到了极大的提升。2005 年, Du 等<sup>[8]</sup>利用 BBO 电光 Q 开关,成功实现了重复频率为 50 kHz 的端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光器运转,输出激光脉宽 11.3 ns,光-光转换效率 41.5%,这是目前为止有关 BBO 电光 Q 开关在激光器系统应用中重复频率最高的报道。2010 年唐昊等<sup>[9]</sup>将 LGS 晶体电光 Q 开关应用在 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中。在重复频率为 30 kHz 时,实现了最大平均功率 6.2 W,脉宽 9.1 ns,斜率效率 32.7% 的激光输出。与 BBO 和 LGS 晶体相比,RTP 晶体具有高的电阻率和更大的电光系数,可以明显降低电光 Q 开关的工作电压。此外,RTP 晶体的光损伤阈值高,室温环境下无潮解而且没有压电环效应<sup>[10]</sup>。可以说,RTP 晶体更适合用作高重复频率电光 Q 开关。2010 年, Yu 等<sup>[11]</sup>首次报道了端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> RTP 电光调 Q 激光器。在重复频率 100 kHz 下,得到了最大平均功率 7.9 W、最窄脉宽 20.2 ns 的激光输出,对应的光-光转换效率为 32.5%。但是未见 RTP 电光 Q 开关在重复频率高于 100 kHz 时应用的报道。

由以上可以看出,目前应用于高重复频率电光调 Q 激光器的激光增益介质基本集中在 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 两种。由于两种晶体具有大的受激截面和高的吸收系数,可以提供实现激光器高重复频率运转所需的高增益,而适中的上能级寿命更可以实现窄的脉宽输出。除此之外,Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体属于自然双折射晶体,输出是线偏振光,这就避免了多余的热致双折射,使得退偏损耗大大减小,特别有利于应用在电光调 Q 激光器上。本

文利用生长型复合晶体作为激光增益介质,改善了激光器的热效应,实现了 RTP 电光调 Q 激光器 150 kHz 基模运转。最大平均输出功率 10.8 W,最窄脉宽 12.7 ns,对应的光-光转换效率达到 43.2%,并且详细比较了生长型复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在高重复频率 RTP 电光调 Q 激光器中的表现。

## 2 实验装置

近几年来,复合晶体已被证明可以有效地改善由端面形变引起的热透镜效应,从 Chang 等<sup>[12]</sup>的实验结果来看,复合晶体的热透镜焦距比传统晶体长了 2 倍以上。现在,随着复合晶体制造工艺的提高产生了生长型复合晶体,基本原理是:首先正常生长掺杂激活离子的晶体,然后设法延缓其生长并开始非掺杂区的生长,避免了传统复合晶体表面处理带来的缺陷<sup>[13,14]</sup>。高重复频率 RTP 电光调 Q 激光器示意图如图 1 所示。实验采用端面抽运的方式,抽运源为光纤耦合 LD(JOLD-30-FC-14, JENOPTIK),最大输出功率为 30 W,中心波长 808 nm。光纤芯径为 400 μm,数值孔径 NA 为 0.22。两片平-凸消色差透镜构成了光耦合系统,耦合效率大于 97.5%,通过光耦合系统聚焦到晶体上的抽运光斑半径约为 250 μm。增益介质采用同样规格 a 轴切割的复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,大小均为 3 mm×3 mm×(4+7+4) mm,其中双端 4 mm 没有掺杂 Nd<sup>3+</sup>,7 mm 掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的浓度为 0.4%(原子数分数),晶体两个端面均镀有 808 nm 和 1064 nm 的高透膜。另外,为了使晶体有效冷却,将其四周用铝箔包裹后放置于紫铜热沉中,并用半导体制冷器(TEC)对其进行冷却,温度设定在 15 °C±0.2 °C。入射镜 M<sub>1</sub> 为平面镜,入射端面镀 808 nm 增透膜(R<0.2%),另一端镀 808 nm 高透膜(R<5%)、1064 nm 全反膜(R>99.9%)。输出镜 M<sub>2</sub> 是曲率半径为 200 mm 的平凹镜,

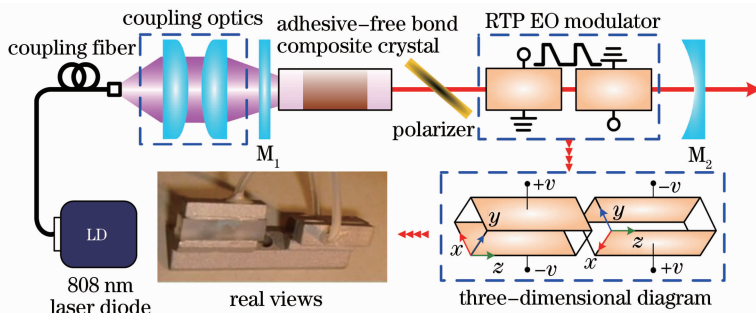


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

凹面对 1064 nm 的透射率为 36%，M<sub>1</sub> 镜与 M<sub>2</sub> 镜构成腔长约为 90 mm 的热稳平凹腔。调 Q 方式采用退压式，RTP 晶体作为高频电光 Q 开关放在偏振片和输出镜之间。由于 RTP 晶体为双轴晶体，为了补偿温度产生的双折射效应，常将两块晶体沿通光方向正交放置。实验中两块相同尺寸的 *x* 切向 RTP 晶体沿 *z* 轴彼此平行，*x* 与 *y* 轴相互旋转 90° 放置。RTP 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm，双端面镀有 1064 nm 增透膜 ( $R < 1\%$ )，与 *y* 轴垂直的两个 *x-z* 面是 Q 开关的电极，四分之一波电压为 570 V。电光调 Q 驱动源的上升和下降时间都少于 10 ns，脉冲延迟时间设定在 1 μs。

### 3 实验结果及分析

在同样的实验条件下分别进行复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的高重复频率 RTP 电光调 Q 实验。在高重复频率调 Q 实验中，使用 OPHIR 的 L30A-V1 功率计测量平均输出功率，光电探测器 (DET10A1M, Thorlabs) 和数字示波器 (TDS2012B, Tektronix) 分别用来检测脉冲信号和测量脉冲宽度，CCD 相机 (GRAS-2045M-C, Spiricon) 和光束质量分析仪 (M<sup>2</sup>-200 s-FW, Spiricon) 分别被用作测量输出激光光强的二维和三维分布以及它们的光束质量因子  $M^2$ 。图 2 为 150 kHz 重复频率下，复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的 1064 nm 激光平均输出功率和脉冲宽度随着抽运功率的变化曲线，出于保护复合晶体的目的，最大抽运功率为 25.0 W。当抽运功率为

25.0 W 时，复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的最高平均输出功率分别为 10.8 W 和 9.98 W，未见饱和现象，对应的光-光转换效率分别为 43.2% 和 39.9%，斜率效率分别为 45.5% 和 43.0%。从图中可以看出，在抽运功率低于 21.7 W 的范围内，两块复合晶体的平均输出功率无明显差别，但是当抽运功率高于 21.7 W 时就出现了明显的不同。当抽运功率为 21.7 W 时，复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体得到了最窄 12.7 ns 的脉宽，最窄脉宽波形和 150 kHz 脉冲序列如图 3 所示，峰-峰脉冲波动度小于 4%。图 4 为复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器在 21.7 W 抽运功率 150 kHz 重复频率下的激光光强的二维和三维分布。从图 4 中明显可以看出激光为 TEM<sub>00</sub> 模输出，进一步测得的 *x* 和 *y* 方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.116 和 1.108，如图 5 所示。

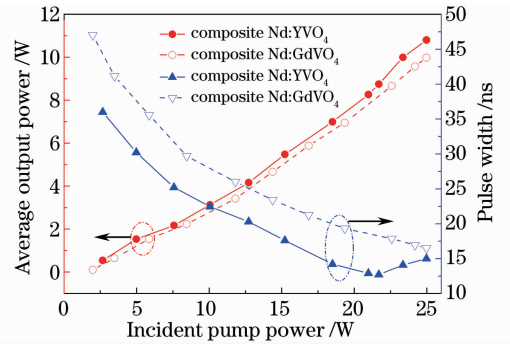


图 2 重复频率 150 kHz 时平均输出功率和脉冲宽度随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power and pulse width versus incident pump power at 150 kHz

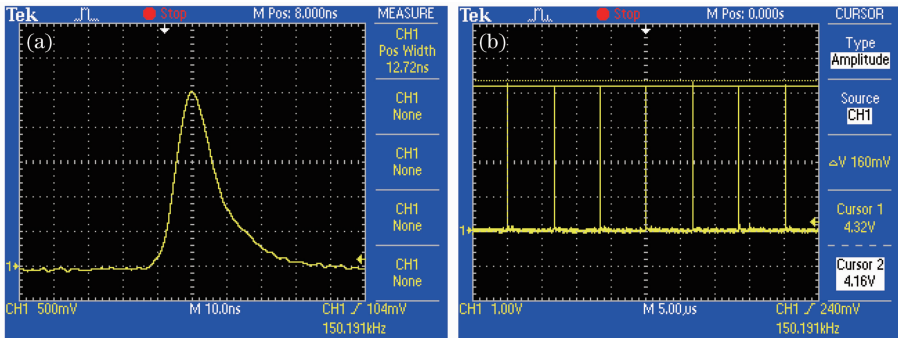


图 3 (a) 复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体单脉冲波形图；(b) 150 kHz 稳定脉冲序列

Fig. 3 (a) Oscilloscope traces of the single pulse; (b) oscilloscope traces of stable pulse series at 150 kHz

当激光器调 Q 运转时，调 Q 脉冲输出取决于超阈值度  $N_i/N_t$ ，通过分析速率方程结合 Degnan 调 Q 优化理论得到<sup>[15]</sup>：

$$\frac{N_i}{N_t} \propto \tau \sigma_{em} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1}{f\tau}\right) \right], \quad (1)$$

式中  $\tau$  为上能级寿命， $\sigma_{em}$  为 1064 nm 的受激发射截

面。从(1)式可以看出在抽运时间足够长的前提下，当激光器高重复频率运转时， $N_i/N_t$  不仅仅只取决于  $\tau \sigma_{em}$  这一乘积，还取决于式中的指数项  $-1/(f\tau)$ 。表 1 为 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在激光器高重复频率运转下的性能比较。

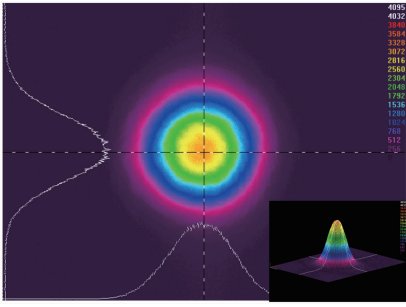


图 4 复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器在抽运功率 21.7 W 重复频率 150 kHz 下的激光光强的二维和三维分布

Fig. 4 Distributions of laser beam intensity for 150 kHz E-O Q-switching adhesive-free bond composite Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 21.7 W pump power

表 1 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在高重复频率下的性能比较

Table 1 Comparison on the performance of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal under high repetition rates

Gain medium	Upper level lifetime $\tau / \mu\text{m}$	Stimulated emission cross-section $\sigma / (10^{-19} \text{ cm}^2)$	$\frac{N_1}{N_t} \propto \tau \sigma_{\text{em}} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{f\tau}\right) \right]$		
			$f=50 \text{ kHz}$	$f=100 \text{ kHz}$	$f=150 \text{ kHz}$
Nd:YVO <sub>4</sub>	90	15.6	280	148	100
Nd:GdVO <sub>4</sub>	95	7.6	137	72	49

以上分析可以说明,在相同抽运功率下,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体可以提供更高的增益,即在高重复频率下电光调 Q 运转时 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器可以输出更窄的脉宽和更高的峰值功率,实验中得到了相似的结果。由前面实验可知,当抽运功率为 21.7 W 时,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体获得了最窄的脉冲宽度输出。所以图 6 对比了复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和复合 Nd:GdVO<sub>4</sub> 电光调 Q 激光器在 21.7 W 抽运功率下,脉冲宽度和峰值功率随不同重复频率的变化。重复频率范围取 20~150 kHz。

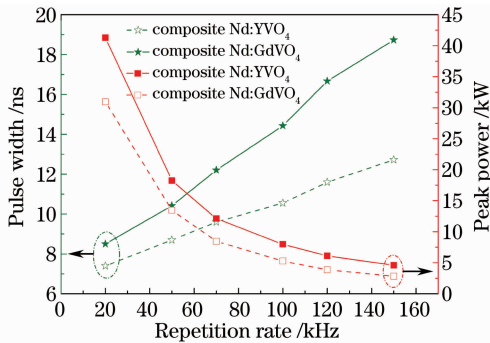


图 6 21.7 W 抽运功率下脉冲宽度和峰值功率随重复频率的变化

Fig. 6 Pulse width and peak power versus repetition rate at 21.7 W pump power

从实验结果中看出,当电光调 Q 激光器以高重

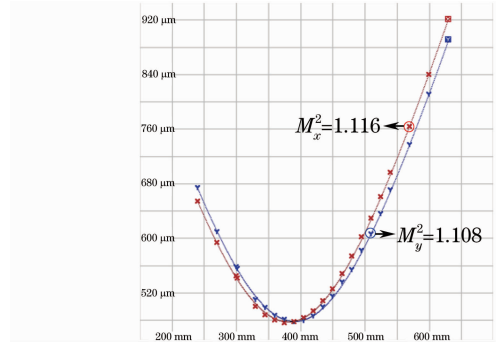


图 5 150 kHz 复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 电光调 Q 激光器光束质量测量结果

Fig. 5 Measurement result of the beam quality for 150 kHz E-O Q-switching adhesive-free bond composite Nd:YVO<sub>4</sub> laser

复频率运转时,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的峰值功率和脉冲宽度明显更高和更窄。重复频率为 150 kHz 时,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体分别获得 4.59 kW 和 2.84 kW 的峰值功率。以上结果表明,在中小抽运功率下,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 比复合 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体更容易获得高功率和窄脉冲宽度的激光输出。在图 2 中当抽运功率高于 21.7 W 时,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体平均输出功率的斜率效率明显变大,这是由晶体热透镜效应引起多模起振造成的,而相应的热效应还会使 Q 开关处渡越时间增加,导致脉宽展宽。相比复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,复合 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的平均输出功率和脉冲宽度随着抽运功率的增加变化却很小,说明 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在热性能方面的表现更加优秀,更适合应用在高抽运功率的激光系统中,当抽运功率为 25 W 时,获得最窄 16.5 ns 的脉宽。

## 4 结 论

本文利用双 RTP 晶体结构电光 Q 开关,通过 LD 端面抽运生长型复合晶体实现了最高重复频率 150 kHz 的激光输出,并且详细对比了复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在高重复频率电光调 Q 激光器中的表现。在抽运功率为 25 W,重复频率为

150 kHz 条件下,复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体得到最大平均输出功率分别为 10.8 W 和 9.98 W,对应的斜率效率为 45.5% 和 43%,最窄脉冲宽度分别为 12.7 ns 和 16.5 ns。当抽运功率为 21.7 W 时,在 150 kHz 重复频率下复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体分别获得峰值功率 4.59 kW 和 2.84 kW 的脉冲激光输出,进一步测得复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在  $x$  和  $y$  方向的输出光束质量  $M^2$  因子分别为 1.116 和 1.108,实现了 TEM<sub>00</sub> 模输出。实验表明了在中抽运功率下,具有更大发射截面和适中上能级寿命的复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体更容易实现高功率、窄脉宽激光输出。而热性能更加出色的复合 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在高抽运功率时将会取代复合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体成为最适合高重复频率运转的激光增益介质。

### 参 考 文 献

- 1 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. Investigation on LD double-end-pumped high power Q-switched YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> fundamental mode solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2409~2414  
赵智刚,董延涛,潘孙强等. LD 双端面抽运 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub> 复合晶体的高功率调 Q 基模激光器研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2409~2414
- 2 Zhang Haikun, Xi Daoming, Wang Jing *et al.*. Control of the pulse duration in a diode-pumped doubly Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 797~801  
张海鹏,席道明,王 静等. 双调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的脉宽控制[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 797~801
- 3 Feng Yutong, Meng Junqing, Chen Weibiao. High pulse repetition rate, doubly Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 12~15  
冯宇彤,孟俊清,陈卫标. 高重复频率双调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 12~15
- 4 Feng Yutong, Zhu Xiaolei, Tang Hao *et al.*. Characteristics of RbTiOPO<sub>4</sub> electro-optic Q-switch operation at high repetition rate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 617~621

- 冯宇彤,朱小磊,唐 昊等. 磷酸钛氧铷高重复率电光调 Q 特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 617~621
- 5 Zhu Chencheng, Nie Jinsong, Tong Zhongcheng. Analysis on the mode of high repetition laser jamming[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(6): 1060~1063  
朱陈成,聂劲松,童忠诚. 高重复频率光干扰模式的分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(6): 1060~1063
  - 6 Liu Liren. Laser communications in space optical link and terminal technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
  - 7 Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli *et al.*. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1654~1659  
朱小磊,唐 昊,李小莉等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1654~1659
  - 8 K. Du, D. Li, H. Zhang *et al.*. Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2): 87~89
  - 9 Tang Hao, Zhu Xiaolei, Meng Junqing *et al.*. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 137~141  
唐 昊,朱小磊,孟俊清等. 高重复频率窄脉宽 LGS 电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 137~141
  - 10 M. Roth, N. Angert, M. Tseitlin *et al.*. Strength problems and heat and mass transfer[C]. 2000 Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Single Crystal Growth, 2000, **2**: 416
  - 11 X. Yu, C. Wang, F. Chen *et al.*. Comparison of electro-optical and acousto-optical Q-switched, high repetition rate Nd:GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(3): 442~445
  - 12 Y. T. Chang, Y. P. Huang, K. W. Su *et al.*. Comparison of thermal lensing effects between single-end and double-end diffusion-bonded Nd:YVO<sub>4</sub> crystals for <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>1/2</sub> and <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> → <sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> transitions[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 21155~21160
  - 13 X. Li, X. Yu, J. Gao *et al.*. Laser operation of LD end-pumped grown-together Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> composite crystal[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, **5**(6): 429~432
  - 14 J. Goujon, O. Musset. Comparison between 2 different composite Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystals in a fibre coupled diode pumped laser[J]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2008. WB5
  - 15 J. J. Degnan. Theory of the optimally coupled Q-switched lasers[J]. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(2): 214~220