

高重复频率大能量单纵模主振荡激光器

戴殊韬 李锦辉 史 斐 邓 晶 吴鸿春 郑 晖 翁 文 葛 燕 黄见洪 林文雄

(中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要 研制了一台高重复频率电光调 Q 单纵模主振荡激光器。利用高速电子电路负反馈控制系统, 在激光器谐振腔内引入一个随光强动态变化的损耗, 建立了准连续的预激光状态, 在此基础上进行电光调 Q, 加上谐振反射器的纵模选择作用, 最终实现了稳定的单纵模输出。激光重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 15 ns, 最高脉冲能量为 2 mJ, 在 30 min 时间内, 单纵模几率达 100%。激光器结构紧凑, 系统简单可靠, 已成功应用于激光振荡-放大系统的振荡器中。

关键词 激光器; 单纵模; 谐振反射器; 预激光; 负反馈; 电光调 Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1202001

High RepetitionRate High Pulse Energy Single Longitudinal Mode Master Oscillator Laser

Dai Shutao Li Jinhui Shi Fei Deng Jing Wu Hongchun Zheng Hui
Weng Wen Ge Yan Huang Jianhong Lin Wenxiong

(Key Laboratory of Optoelectronic Material Chemistry and Physics, Fujian Institute of Matter Structure, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract A high-repetition-rate electro-optic Q-switched single longitudinal mode laser has been developed. Using a fast electronic circuit negative feedback control system, the laser cavity generates dissipation varying with laser intensity and the quasi-continuous pre-lase is established, then the Q-switch is turned on based on this pre-lase. Stable single longitudinal mode laser output is generated with the mode selection of the resonant reflector. The laser has produced pulse with width of 15 ns, maximum pulse energy of 2 mJ at 1 kHz repetition rate, and single longitudinal mode probability of 100% within 30 min. The laser system is compact, simple, reliable and has been used as a master oscillator of master oscillator power-amplifier (MOPA) systems.

Key words lasers; single longitudinal mode; resonant reflector; pre-lase; negative feedback; electro-optic Q-switch

OCIS codes 140.3570; 140.3540; 140.3530; 140.3480

1 引 言

高重复频率电光调 Q 单纵模激光器有着广泛的应用, 例如激光振荡-放大系统中的主振荡器^[1-2]、非线性光学效应、远程激光雷达、激光全息照像等^[3-4]。采用预激光技术^[5]获得主动调 Q 单纵模的全固态激光器具有结构紧凑, 系统简单, 成本较低等优点。Bollig 等^[6]采用声光调 Q 衍射预激光反馈控制技术, 取得了重复频率为 1 kHz, 平均功率为 59 mW 的单纵模输出。林宏免等^[7]采用双台阶脉冲发生器产生预

激光, 获得了电光调 Q 脉冲能量为 1.156 mJ, 重复频率为 1 Hz 的单纵模激光输出。韦辉等^[8]利用光电导光强负反馈技术动态调节腔内损耗形成预激光, 获得了重复频率为 1 Hz 的电光调 Q 环形腔激光单纵模输出, 输出能量未见报道。Yan 等^[9]采用增益控制预激光负反馈方法获得 50 Hz, 45 μ J 的声光调 Q 环形腔单纵模激光。Lian 等^[10]采用端部抽运 Nd:YAG 声光调 Q 环形腔结构, 获得了平均功率为 1 W, 重复频率为 2 kHz, 脉宽为 475 ns 的单纵模激光输出。

收稿日期: 2014-05-26; **收到修改稿日期**: 2014-06-26

作者简介: 戴殊韬(1983-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: daishutao@fjirsm.ac.cn

导师简介: 林文雄(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事全固态激光及系统集成技术方面的研究。

E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn(通讯联系人)

目前报道的采用预激光技术输出单纵模的激光器一般采用声光调 Q 环形腔结构,高重复频率运转时能量偏低、脉宽偏宽,采用电光调 Q 方式运转则重复频率偏低。本文采用快速电子电路主动控制腔内损耗,建立一个可控的准连续预激光状态,再配合谐振反射器的选模作用,获得了稳定的高重复频率大能量电光调 Q 单纵模激光脉冲输出,重复频率为 1 kHz,最大单脉冲能量为 2 mJ,脉宽为 15 ns。

2 基本原理

激光器中单纵模的产生是腔内模式竞争的结果。激光在建立过程中经历 q 个来回之后,模式 m 和模式 n 的功率 P_n 和 P_m 之比的近似值为^[11]

$$P_n/P_m = \left(\frac{1-L_n}{1-L_m} \right)^q \cdot (1-L_n)^{q(g_m/g_n-1)}, \quad (1)$$

式中 L_m 、 L_n 分别为模式 m 和模式 n 在腔内每个来回的损耗, g_m 和 g_n 分别为这两种模式的增益系数。

从(1)式可以看出,为了更好地选出单纵模,首先要增加模式之间的增益差别,即增大 L_m 、 L_n 和 g_m 、 g_n 之间的差异,其次是使激光在腔内经历尽可能多的往返次数,增加脉冲建立时间,即增大 q 。

通过谐振反射器或腔内插入倾斜标准具,利用干涉选模的原理可以使荧光谱线中心附近的模式增益发生变化。未镀膜的标准具精细度低,很难有效选模,而镀膜的标准具在高功率谐振腔内容易损伤,并且在腔内插入元件会增大腔的损耗,增加腔的不稳定性,不适合用在高重复频率大能量单纵模主振荡激光器中。以谐振反射器代替标准的介质膜输出镜,也能有效选模,选用多片谐振反射器,即使界面不镀膜,只要合理选择材料和单片之间的距离,其组合反射率极值也能达到 40% 以上。

Watts^[12] 采用薄膜光学中的特征矩阵方法来计算多界面谐振反射器的反射特性。实验所用的空气隙两片谐振反射器,其特征矩阵为^[13]

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^3 \mathbf{M}_j = \prod_{j=1}^3 \times \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{K}_0 n_j Z_j \cos \theta_j) & -\frac{i}{q_j} \sin(\mathbf{K}_0 n_j Z_j \cos \theta_j) \\ -iq_j \sin(\mathbf{K}_0 n_j Z_j \cos \theta_j) & \cos(\mathbf{K}_0 n_j Z_j \cos \theta_j) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 n_j 、 Z_j 、 θ_j 、 q_j 分别为第 j 层介质的折射率、厚度、光波与界面法线的夹角以及导纳, \mathbf{K}_0 为真空中的波矢量。根据实验所用的双片相同材料相同厚度的晶体组成的空气隙谐振反射器,(2)式可以简化为

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^3 \mathbf{M}_j = \prod_{j=1}^3 \times \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ -in_j \cos \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 δ_j 为界面之间的相位差。图 1 所示为根据(3)式计算出的波长为 1064.4~1064.8 nm 的谐振反射器反射率和谐振反射器参数关系的计算结果。计算采用的谐振反射器材料为 YAG 白片(折射率 $n=1.82$)或 JGS1 白片(折射率 $n=1.45$), d 为单片谐振反射器的厚度, L 为两片谐振反射器之间空气隙的距离。图 1(a)中 $d=3$ mm, $L=25$ mm, 材料分别为 YAG 和 JGS1; 图 1(b)中 $L=15$ mm, 材料为 YAG, d 分别为 4 mm 和 1 mm; 图 1(c)中 $d=4$ mm, 材料为 YAG, L 分别为 15 mm 和 25 mm。

仔细分析计算结果发现单片谐振反射器决定了整个器件的周期,空气隙的谐振决定了主峰,单片材料的厚度决定了反射率分布的周期,材料的折射率决定了器件的峰值反射率。材料的折射率越大,峰值反射率越大,但是空气隙间隔和单片材料的厚度要根据实验具体条件折中选择。

室温下 Nd:YAG 的荧光谱线线宽高达 0.45 nm,

因此仅用谐振反射器在高增益谐振腔内还不足以选出单纵模,需要增加脉冲建立时间。根据(1)式,选模器因为具有不同反射率而产生的模式鉴别为

$$P_n/P_m = (R_n/R_m)^q, \quad (4)$$

式中 R_n 和 R_m 分别为模式 n 和 m 在谐振反射器中的反射率。其结果如图 2 所示。可以看到相邻两个模式的输出功率之比随着往返次数的增加迅速增大。一般主动调 Q 激光器的脉冲建立时间都很短,在几百纳秒以内,模式在腔内的往返次只有数十次,无法有效选模。而预激光技术克服了上述缺点,延长了脉冲建立时间,增加了往返次数,从而提供了有效的选模机制。

在预激光技术中,激光器装置和典型的主动调 Q 激光器一样,只是以可饱和吸收体的方式来运行 Q 开关。最初 Q 开关只是部分打开,抽运使得增益持续增大,直到有脉冲输出(自由运转),此时激光在阈值附近振荡,通过负反馈电子电路监控脉冲的强

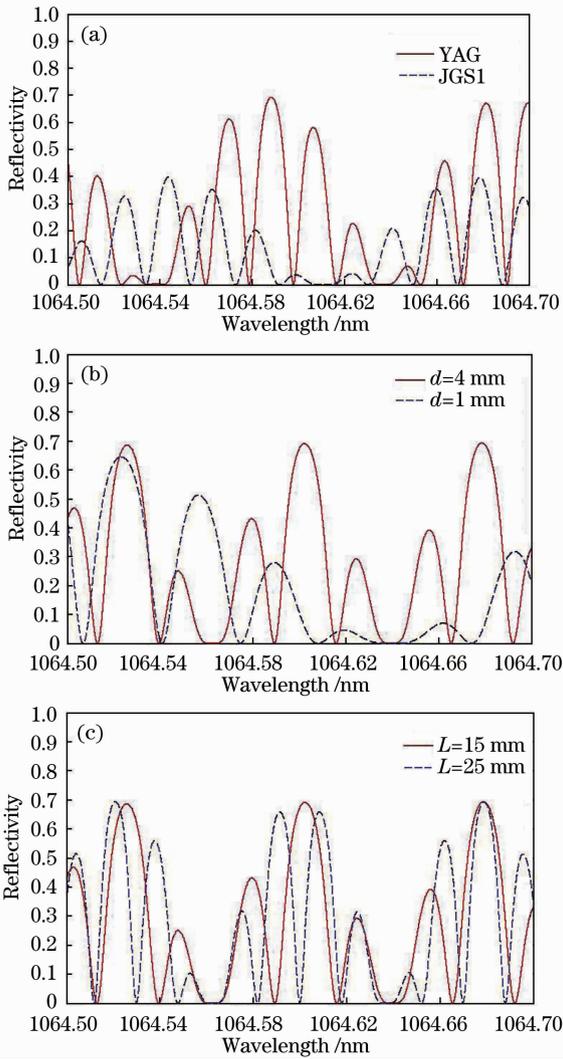


图1 谐振反射器特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves of resonant reflector

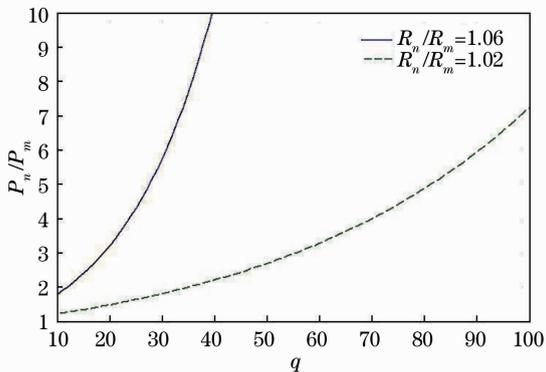


图2 脉冲建立过程中的选模

Fig. 2 Mode selection in pulse buildup

度,使得脉冲强度保持在低水平一段时间,在这段时间内,腔内起振的纵模数少,且激光形成时间较长,纵模之间的竞争较为充分,容易形成单纵模种子。之后完全打开Q开关,在该种子基础上建立起稳定的单纵模调Q脉冲。

3 实验

自行研制的高重复频率单纵模电光调Q Nd:YAG激光器结构如图3所示。增益介质为尺寸 $\Phi 3\text{ mm} \times 65\text{ mm}$,掺杂1% (原子数分数)的Nd:YAG(6),半导体抽运阵列(LDA)工作频率为1 kHz,峰值抽运功率为2 kW。谐振腔由全反镜(1)和谐振反射器(9)组成,腔长为400 mm。全反镜为曲率半径为1 m的凹面镜,谐振反射器由两片未镀膜厚度为4 mm的YAG片中间间隔15 mm的空气隙组成,作为谐振腔的输出镜同时又是模式选择器,其反射特性曲线如图1(b)实线所示。采用BBO晶体(福晶BPC3AS)作为电光Q开关(3),其a端接脉冲高压源(Marxbank)和1/4波片(2)一起作为升压式调Q运转,b端接负反馈控制系统(FBC)产生的电压。布儒斯特偏振片(4)反射部分激光,由PIN光电探测器(Thorlabs PDA10CS-EC)接收,提供给FBC做光强负反馈。小孔(8)材料为不锈钢,面对激光棒一侧加工为一定角度的锥面以防止放大的自发辐射(ASE),小孔直径为1 mm,用来选TEM₀₀横模,1/4波片对(5)、(7)成正交放置,使光场在1/4波片之间形成“扭转模”,用来消除驻波腔的空间烧孔效应。

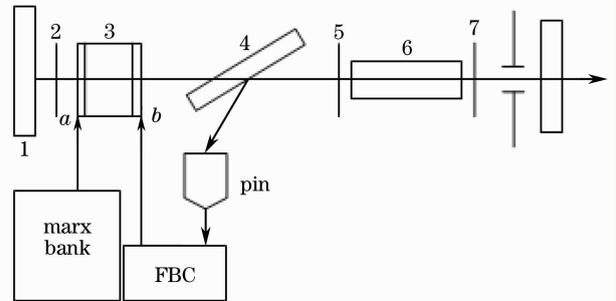


图3 谐振腔结构示意图

Fig. 3 Scheme of oscillator

实验时,首先FBC在b端施加一个静态低电压(约为200 V),引入一个固定的损耗,使得Q开关没有完全关门。打开电源,LDA开始抽运直到有弛豫振荡激光输出。根据接收到的光强,FBC在b端产生一个在原先静态电压基础上的动态电压,即引入一个随光强变化的动态损耗,使得谐振腔的增益和激光强度成反比,于是最初弛豫振荡的分立尖峰序列被压低,成为一个比较平坦的区域,这就是预激光状态,如图4所示。预激光的特点是:比自发辐射噪声强许多,并且其模式与谐振腔的固有模式相匹配。因为此时谐振腔增益较低,只有最接近增益曲线峰值的模式才可能形成振荡,从而抑制了其他模式的产

生。预激光负反馈控制电路的工作原理如图 5 所示。

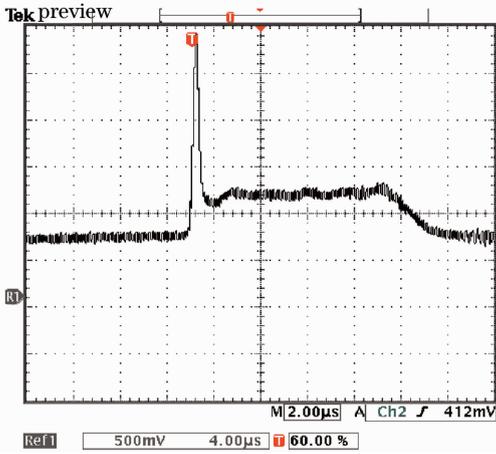


图 4 预激光波形

Fig. 4 Waveform of pre-laser

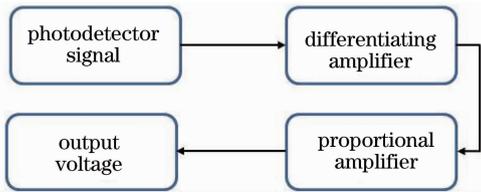


图 5 负反馈控制电路原理图

Fig. 5 Block diagram of FBC

预激光的最佳长度一般在 $10 \sim 20 \mu\text{s}$ 之间,但是预激光的长度与谐振腔结构特性和抽运光源的稳定性有关,会随机漂移。如果预激光太长,则输出脉冲能量减小,稳定性变差;如果太短,则没有足够的选模时间,输出脉冲将是多纵模。通过测量预激光的起始时间,并动态调整施加在 b 端的初始静态电压来保持预激光的长度就可以解决这个问题。

在预激光的中间位置打开 Q 开关,激光器输出调 Q 脉冲。激光通过漫反射屏后由 25 GHz 带宽的超高速光纤耦合光电探测器 (New Focus Model1434) 接收,并连接在高速示波器 (LeCroy SDA13000) 上观察脉冲波形,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,激光器输出的是没有调制的光滑的高斯型脉冲波形,脉宽约为 15 ns 。同时示出的是未加预激光负反馈控制时输出的调制拍频脉冲波形。

用功率计 (Ophir F250A-BB-35) 进行测量,在 1 kHz 重复频率下激光器最高输出功率达 2 W ,单脉冲能量可达 2 mJ ,功率不稳定性小于 $\pm 2\%$ 。

最后采用法布里-珀罗 (F-P) 标准具干涉法验证系统输出的是单纵模。标准具的自由光谱区 (FSR) 为 10 GHz ,精细度在 $15 \sim 20$ 之间,透过标准具的光用电荷耦合元件 (CCD) 相机 (Spiricon BGS-FWB-GRAS20) 采集结果如图 7 所示。标准具的线宽分辨

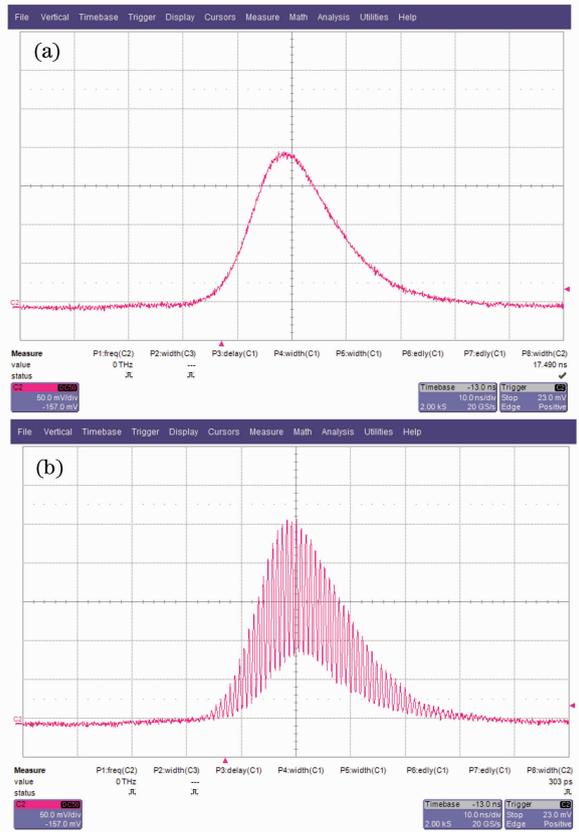


图 6 调 Q 脉冲波形。(a) 加入预激光负反馈; (b) 未加预激光负反馈

Fig. 6 Waveform of Q -switched pulse. (a) With pre-laser feedback; (b) without pre-laser feedback

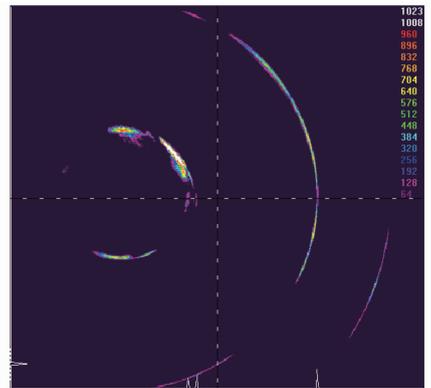


图 7 F-P 标准具干涉图

Fig. 7 Interference fringes measured by F-P etalon 率约为 500 MHz ,因此,得到的激光器输出线宽小于 500 MHz 。

通过示波器记录输出脉冲,长时间 (30 min) 观察,单纵模几率达到 100% 。超过这个时间则会在示波器上观察到由多纵模叠加形成的拍频,随后又会恢复到单纵模状态。究其原因,认为是高重复频率运转下, $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的热致双折射效应会导致空间烧孔效应的出现,腔内的高功率密度也导致谐振反

射器的热不稳定,影响选模效果。

4 结 论

采用预激光技术,研制出了一台半导体阵列侧面抽运,电光调 Q Nd:YAG 单纵模激光器,重复频率为 1 kHz,脉宽约为 15 ns,最高平均功率为 2 W,脉冲能量为 2 mJ。激光器结构紧凑,系统简单可靠,成本较低,已经成功地用于激光振荡-放大系统的主振荡器。

参 考 文 献

- 1 Wang Haocheng, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Research progress of high repetition rate and high power laser with SBS-phase conjugate mirror[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 040001.
王昊成, 樊仲维, 余锦, 等. 带 SBS 相位共轭镜的高重复频率高功率激光系统研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040001.
- 2 Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. Investigation on characteristics of large aperture tapered fiber phase conjugation mirror for kHz high energy MOPA laser system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402007.
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 用于千赫兹高能量 MOPA 激光系统的大口径锥度光纤相位共轭镜特性研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0402007.
- 3 T Schröder, C. Lemmerz, O. Reitebuch, *et al.*. Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for a Doppler wind lidar[J]. *Appl Phys B*, 2007, 87(3): 437-444.
- 4 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 40(1): 0113001.

- 何涛, 侯鲁健, 吕波, 等. 激光雷达探测反演 PM2.5 浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2012, 40(1): 0113001.
- 5 A J Berry, D C Hanna, C G Sawyers. High power single frequency operation of a Q-switched TEM₀₀ mode Nd:YAG laser[J]. *Opt Commun*, 1981, 40(1): 54-58.
 - 6 C Bollig, W A Clarkson, D C Hanna. Stable high-repetition-rate single-frequency Q-switched operation by feedback suppression of relaxation oscillation[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(12): 1383-1385.
 - 7 Lin Honghuan, Sui Zhan, Li Mingzhong, *et al.*. Practical laser-diode pumped pre-lase electro-optic Q-switched single-longitudinal-mode laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(8): 915-918.
林宏免, 隋展, 李明中, 等. 实用的 LD 抽运预激光电光调 Q 单纵模激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(8): 915-918.
 - 8 Wei Hui, Xu Shizhong, Ma Zhonglin, *et al.*. LDA pumped highly stable Nd:YLF ring laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(1): 5-8.
韦辉, 许世忠, 马忠林, 等. 激光二极管阵列抽运的高稳定 Nd:YAG 环形激光器[J]. *中国激光*, 2004, 31(1): 5-8.
 - 9 P Yan, M Gong, T Xie, *et al.*. Stabilization of pulse-to-pulse energy and width by gain-controlled pre-lase in laser-diode-pumped Q-switched laser[J]. *Opt Eng*, 2003, 42(1): 159-162.
 - 10 T Lian, S Wang, D Cai, *et al.*. High repetition rate, high peak power, pulsed single-longitudinal-mode Nd:YAG laser by self-injection-seeding[J]. *Opt Commun*, 2014, 323: 154-161.
 - 11 W Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl., Beijing: Science Press, 2002. 222-225.
克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 222-225.
 - 12 JK Watts. Theory of multiplate resonant reflectors[J]. *Appl Opt*, 1968, 7(8): 1621-1623.
 - 13 Lu Zukang, Qiu Wenfa. Mode selection characteristics of four-mirror resonant reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, 4(5): 457-462.
陆祖康, 邱文法. 四界面谐振反射器的选模特性[J]. *光学学报*, 1984, 4(5): 457-462.

栏目编辑: 胡冰