

抗失谐高光轴稳定度激光器

罗旭 王鹏飞 李久喜 侯天禹 陈斌

华北光电研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

摘要 采用双直角棱镜(DRP)腔,利用直角棱镜(RP)的自对准特性,使激光器系统对冲击、振动及温度波动保持不灵敏性。当激光器重复频率为 20 Hz 时,输出能量为 60 mJ,脉冲宽度为 11 ns,经过 10 倍扩束后发散角为 0.11 mrad,30 s 内光轴漂移量小于 $5 \mu\text{rad}$ 。DRP 腔能够有效改善激光器光轴的稳定性。采用偏振耦合输出时,波片参数和 RP 材料决定耦合输出率。根据理论研究及光机电一体化设计,成功研制出高光轴稳定度激光器。该研究对 DRP 激光谐振腔的参数设计和高光轴稳定度激光器的工程化应用具有一定指导意义。

关键词 激光器;光轴稳定度;偏振耦合;直角棱镜

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091401

Anti-Detuning Laser with High Optical Axis Stability

Luo Xu Wang Pengfei Li Jiuxi Hou Tianyu Chen Bin

Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China

Abstract The use of the double-rectangular-prism (DRP) cavity and the self-aligned feature of the rectangular prism (RP) make laser insensitive to shock, vibration and temperature fluctuations. When the laser repetition rate is 20 Hz, the output energy is 60 mJ, the pulse width is 11 ns, the divergence angle after ten times of beams expansion is 0.11 mrad, and the optical axis drift is less than $5 \mu\text{rad}$ in 30 s. The DRP cavity can effectively enhance the stability of laser optical axis. With a polarization coupling output, the coupling output rate is determined by the wave plate parameter and the RP material. Based on the theoretical study and the electromechanical integration design, a laser with high optical axis stability is successfully developed. The study has certain guiding significance for both the parameter design of DRP cavity and the engineering application of lasers with high optical axis stability.

Key words lasers; optical axis stability; polarization coupling; rectangular prism

OCIS codes 140.3580; 140.3410; 230.5480

1 引言

机载激光器的光轴是光电平台中多种传感器的定位基准,其稳定性是实现目标跟踪、搜索、测距、制导的基础^[1-2]。光电平台中激光的照射精度越高越好,影响因素包括激光光轴的稳定性、光电平台的跟踪精度以及跟踪系统与照射系统光轴的不平行度。光电平台的跟踪精度随着图像采集速度、平台稳定系统反应速度的提升而不断提高,在目前的技术水平下,跟踪精度在 $100 \mu\text{rad}$ 以内^[3]。跟踪系统与照射系统光轴的不平行度受装调精度影响,通常控制在 $50 \mu\text{rad}$ 以内。提高激光光轴稳定度是提高光电平台照射精度的基本保障^[4]。

激光器以一定的重复频率工作时,热导体无法将腔内热量传出,这会导致激光棒甚至激光器机壳的温度场发生变化,使得晶体的热效应和热畸变增大,从而导致光轴发生漂移。受体积限制,普通腔镜热传导冷却激光器的光轴漂移严重,通常大于 $50 \mu\text{rad}$,限制了照射精度的提高^[5]。

采用具有自对准特性的反射镜作为腔镜,能够提供较好的稳定性^[6-7]。将直角棱镜正交放置形成稳定的谐振腔,振荡光束对称交换穿行,能抵消热效应和增益不均匀的影响,改善激光光轴稳定度,同时使激光器对冲击、振动以及温度波动保持不灵敏性。

收稿日期: 2016-04-26; 收到修改稿日期: 2016-05-16; 网络出版日期: 2016-08-26

作者简介: 罗旭(1988—),男,硕士,助理工程师,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: luoxu798@sina.com

2 理论分析和直角棱镜腔设计

2.1 直角棱镜腔共振模

圆形平行平面腔的本征方程^[8]为

$$\chi_m u(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} \exp(-ikL) \int_0^a \int_0^{2\pi} r' dr' d\varphi' u(r', \varphi') \cdot \exp\left\{-ik \left[\frac{1}{2L} (r^2 + r'^2) - \frac{rr'}{L} \cos(\varphi' - \varphi) \right]\right\}, \quad (1)$$

式中 χ_m 为本征值, $u(r, \varphi)$ 为平面内某点的振幅和相位分布函数, r 和 r' 为径向坐标, φ 和 φ' 为方位坐标, L 为腔长, k 为传播常数, a 为谐振腔镜半径。

当取 $u(r, \varphi) = R_m(r) \exp(-im\varphi)$, m 为自然数时, 它的近似解为

$$u_{mn}(r, \varphi) = J_m \left[\frac{v_{mn} r}{a \left(1 + \beta \frac{1+i}{M} \right)} \right], \quad (2)$$

式中 J_m 为 m 阶贝塞尔函数; v_{mn} 为满足方程 $J_m(x) = 0$ 的第 n 个正根; $M^2 = 8\pi N$, N 为非涅耳数; β 是小于 1 的实数。

当两直角棱镜底面平行, 两棱线存在夹角 θ 时, 位置关系如图 1 所示。圆形直角棱镜腔与圆形平行平面腔具有一定相似性, 直角棱镜的反射使得光线在空间上发生位移。当两直角棱镜两棱线存在夹角 θ 时, 考虑到直角棱镜的空间反射作用, 在一次往返行程中, 初始点在空间上关于光轴中心发生位移, 同时沿棱线夹角方向旋转 θ 角度, 此时的本征方程表示为

$$\chi_m u(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} \exp(-ikL) \cdot \int_0^a \int_0^{2\pi} r' dr' d\varphi' u(r', \varphi') \cdot \exp\left\{-ik \left[\frac{1}{2L} (r^2 + r'^2) - \frac{rr'}{L} \cos(\varphi' - \varphi - \pi - \theta) \right]\right\}, \quad (3)$$

(3) 式与 (1) 式本质上只有余弦函数内部因子不同, 但 $u(r, \varphi) = R_m(r) \exp(-im\varphi)$ 的形式已经不能满足角度方向的自再现, 因此采用 $u(r, \varphi) = R_m(r) [\exp(-im\varphi) + \exp(im\varphi)]$ 的形式, m 为自然数, 代入 (3) 式可得角向自再现的条件为

$$\exp(-im\varphi) + \exp(im\varphi) = \exp[-im(\varphi - 2\theta)] + \exp[im(\varphi - 2\theta)], \quad (4)$$

其几何解释如图 2 所示。当 M1 的棱线 a 与 M2 的棱线 b 夹角为 θ 时, 取垂直直角棱镜入射面上任意点 1, 该点发射光线射向直角棱镜反射面, 沿 M1 的棱线 a 轴对称到达点 2 出射, 光线经过 M2 沿 b 轴对称到达点 3, 不难证明点 1 与 3 与光轴中心连线的夹角为 2θ , 继续在腔内传播, 经过多次反射后最终与点 1 重合。

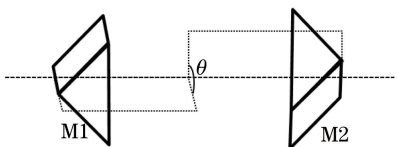


图 1 直角棱镜腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular-prism cavity

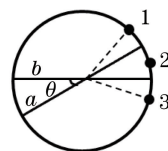


图 2 光线反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light reflection

要使 (4) 式成立, 必须

$$m = 0, \quad (5)$$

或

$$\theta = \frac{l\pi}{m}, l = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

当 (m, l) 为某一组整数时, (6) 式成立, 此时存在三种情况。当 $\theta = 0$ 时, 直角棱镜腔本征方程与圆形平行平面腔本征方程的解完全一致, 存在任意次角向模和径向模; 当 $\theta \neq 0$ 时, 若 θ/π 能用一个分子分母为自然数的分数 l/m (m 不为 0) 表示, 即 θ 为以 π 为单位的有理数时, 除了存在主模外, 还存在少量高次角向模, 其中部分高次角向模被压缩; 当 θ/π 为无理数时, 全部高次角向模均被压缩。在实际应用中, 这种谐振腔很特殊, 与非稳定高损耗间距谐振腔相比, 其模损耗间距为无穷大, 不存在高次角向模。优秀的选模特性使得该谐振腔

较易获得更小的发散角和更好的光轴稳定性,根本原因是谐振腔的空间反射不变性。

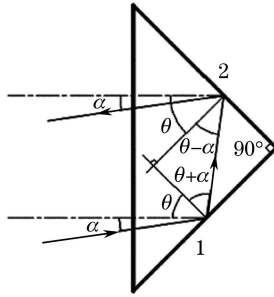


图 3 直角棱镜反射原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection in rectangular prism

直角棱镜的反射原理如图 3 所示,在平行光路中,平行光与入射面法线夹角成 α 入射,对反射面 1 的入射角为 $\theta + \alpha$,光线成 $\theta + \alpha$ 角射至反射面 2,对反射面 2 的入射角为 $\theta - \alpha$,光线成 $\theta - \alpha$ 角出射,因此出射角亦为 α ,即出射光与入射光仍平行,能获得反射像。因此用直角棱镜作反光镜,具有单向敏感的特点。将两块直角棱镜正交放置,入射光经过两个棱镜的往返光线与入射光线方向始终保持平行。

2.2 双直角棱镜腔设计

双直角棱镜腔激光器通常需要偏振耦合光束,常见的双直角棱镜腔如图 4~6 所示,图 4 所示为 Z 型正交直角棱镜腔,图 5 所示为直通直角棱镜腔,图 6 所示为折叠直角棱镜腔。

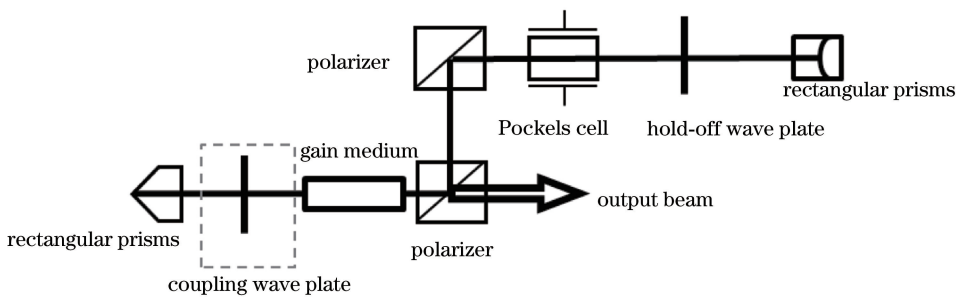


图 4 Z 型正交直角棱镜腔结构俯视图

Fig. 4 Top view of structure of Z-shaped orthogonal-rectangular-prism cavity

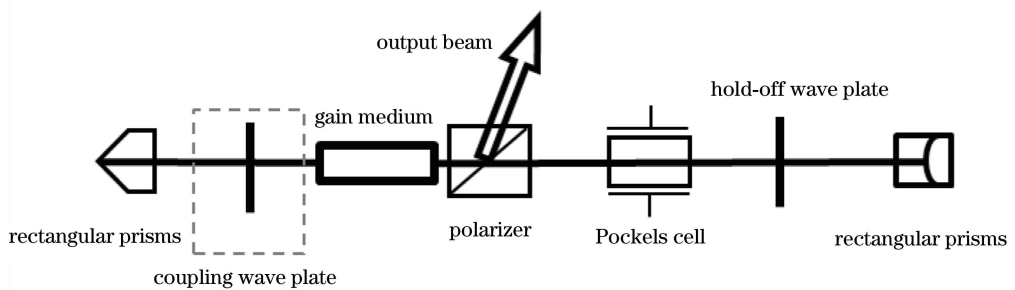


图 5 直通正交直角棱镜腔结构俯视图

Fig. 5 Top view of structure of straight orthogonal-rectangular-prism cavity

谐振腔的选择需要根据实际的参数和空间要求,采用图 5 所示直通腔结构,增益介质采用热性能较好的 Nd:YAG,激光棒直径为 5 mm,电光 Q 开关采用掺氧化镁的铌酸锂晶体,光束通过一个由波片和偏振耦合器组成的耦合输出系统输出,其结构简单且能获得最佳耦合输出率,耦合输出端可简化成如图 7 所示的结构。

当入射光偏振方向与直角棱镜棱线方向存在夹角时,由于光波在直角棱镜内部发生两次全反射,入射光的振幅在平行和垂直入射面两个分量上产生附加相移,因此直角棱镜波片组成的耦合系统存在最大耦合输出率,这是直角棱镜腔的重要参数。

附加相移的大小由直角棱镜的折射率决定^[9],常用的直角棱镜材料包括 K9、BK7 和熔融石英(FS),相

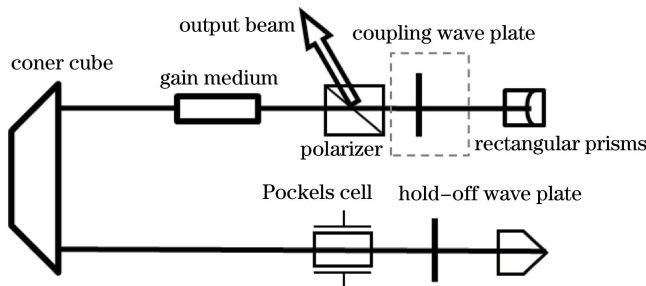


图 6 折叠正交直角棱镜腔结构俯视图

Fig. 6 Top view of structure of folded orthogonal-rectangular-prism cavity

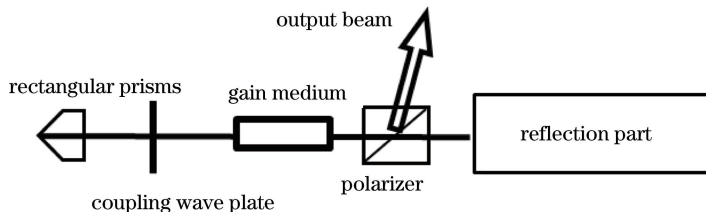


图 7 直角棱镜腔偏振耦合系统输出端示意图

Fig. 7 Schematic diagram of output terminal of rectangular-prism cavity with polarization coupling system

应的折射率分别为 1.516, 1.506 和 1.449^[10]。为了方便分析, 将谐振腔分为输出端和反射端两个部分。当两个直角棱镜正交放置时, 反射端的线偏振光进入输出端, 经过波片与直角棱镜组成的耦合输出系统, 耦合输出率随波片方位角变化。K9 和 BK7 折射率相近, 因此只讨论 K9 与 FS 的情况, 利用 Matlab 软件计算出采用不同数量波片时, 波片旋转一周能够得到的最高耦合透射率, 结果如图 8 所示, 其中 λ 为经过波片的光波长。

最高耦合输出率决定了耦合输出率的可调范围。常用的波片为二分之一波片或四分之一波片, 即波片数为 0.5λ 或 0.25λ 。采用由 0.5λ 波片与直角棱镜组成耦合输出系统时, K9 和 FS 能够达到的最高输出率分别为 54% 和 68%。采用由 0.25λ 波片与直角棱镜组成耦合输出系统时, 波片在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 旋转过程中经过一个周期, 且周期内旋转波片等分为两个对称的区域, K9 和 FS 能够达到的最高输出率分别为 65% 和 54%。这表明, 采用 0.5λ 波片或 0.25λ 波片与直角棱镜组成的耦合输出系统, 由于直角棱镜附加的相位延迟不能完全被抵消, 最高耦合输出率均小于 70%, 受总相位延迟量影响^[10]。

当激光器输出的能量和脉宽一定时, 耦合输出率越低, 激光器谐振腔内功率密度越高, 越容易造成腔内元器件损伤。腔内常用的元器件中, 铌酸锂晶体的损伤阈值较低, 通常范围为 $150 \sim 250 \text{ MW/cm}^2$ (脉冲宽度为 10 ns, 波长为 1064 nm)。为保证激光器长时间可靠工作, 应使腔内功率密度远低于腔内元器件的损伤阈值。

机载测距激光器的典型技术指标为: 激光波长 $1.06 \mu\text{m}$; 能量大于或等于 60 mJ; 脉宽 $(12 \pm 3) \text{ ns}$ ^[3]。当工作输出能量为 60 mJ、脉宽为 11 ns、激光棒直径为 5 mm 时, 腔内功率密度与耦合输出率的关系如图 9 所示。

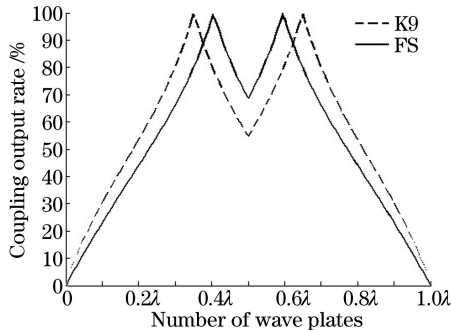


图 8 波片数与最高耦合输出率关系

Fig. 8 Relationship between number of wave plates and maximum coupling output rate

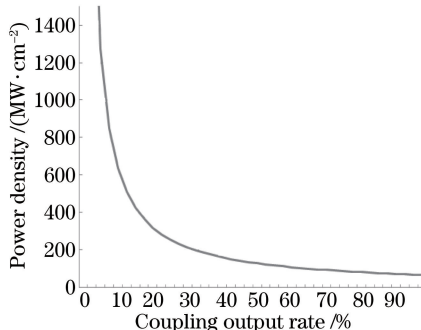


图 9 直角棱镜腔耦合输出率与腔内功率密度的关系

Fig. 9 Relationship between coupling output rate of rectangular-prism cavity and power density in cavity

为保持激光器可靠运转,需要腔内功率密度远低于腔内元件最低损伤阈值,而光学元器件中杂质和缺陷的存在会大大降低元件的损伤阈值。当耦合输出率为 26% 时,腔内功率密度为 150 MW/cm^2 。而实际使用时,激光器往往受腔内或外界环境污染影响^[11]。由 0.5λ 波片与 FS 直角棱镜组成的耦合系统,最大耦合输出率为 68%,腔内功率密度约为 60 MW/cm^2 ;由 0.25λ 波片与 K9 直角棱镜组成的耦合系统,最大耦合输出率为 65%,腔内功率密度约为 62 MW/cm^2 。因此可以使用铌酸锂晶体进行电光调 Q。在保证一定效率的前提下,当激光器处于大能量脉冲工作条件时,保证谐振腔内元件工作在低功率密度下,有利于延长激光器的使用寿命。

3 实验结果及分析

为提高光电系统的跟踪精度,激光器的设计以提高光轴稳定度为目的。采用 K9 双直角棱镜作为腔镜,由棱镜和 0.25λ 波片组成耦合输出系统,增益介质为 Nd:YAG,调 Q 元件为铌酸锂。

激光器的输出能量随耦合输出系统输出率的变化而变化,当注入能量较低时,调节波片仍会使腔内功率密度升高,因此通过静态调节波片找到最大输出率后,再提高注入能量,进行动态调 Q 调试。当注入能量为 410 mJ 时,获得了动态 60 mJ 的能量输出,脉冲宽度为 11 ns。

按照固体激光器通用规范,利用光束分析仪测试系统对激光器发散角和光轴稳定度进行测试,测试原理如图 10 所示。



图 10 发散角和光轴稳定度测试原理图

Fig. 10 Schematic diagram of testing divergence angle and optical axis stability

光束偏移角度平均值 $\Delta\theta$ 是光轴稳定度的评判标准,可表示为

$$\Delta\theta = \bar{Z}/f, \quad (7)$$

式中 \bar{Z} 为光斑平均漂移量, f 为透镜焦距。

测试采用已标定的焦距为 1988 mm 的透镜,光束分析仪型号为 LBA-710PC-D(Ophir-Spiricon 公司,美国)。

用光束分析仪(LBP)测得激光器经过 10 倍扩束后,在水平方向上发散角为 0.1190 mrad,在垂直方向上发散角为 0.1005 mrad。两个方向上的发散角都较小,不存在高次角向模^[12],这得益于直角棱镜腔优异的选模性能。实际应用中需根据目标大小和系统体积重量选择合适的倍率进行扩束。

激光器的光轴稳定度会影响照射精度,采用同一 LBP 系统对光轴稳定度进行测量。激光器以 20 Hz 的模式工作 30 s 后,测得激光光束经透镜聚焦后在 LBP 上形成的光斑质心散点图,如图 11 所示,其中横纵坐标为 LBP 像元位置坐标, R_{Avg} 为质心散点的平均半径,即为光斑平均漂移量。由原始数据计算得出,平均漂移量为 $9.74 \mu\text{m}$ 。根据(7)式计算出,光束偏移角度平均值为 $4.899 \mu\text{rad}$,这个值远小于目前光电平台的跟踪精度和光电平台光轴不平行度。

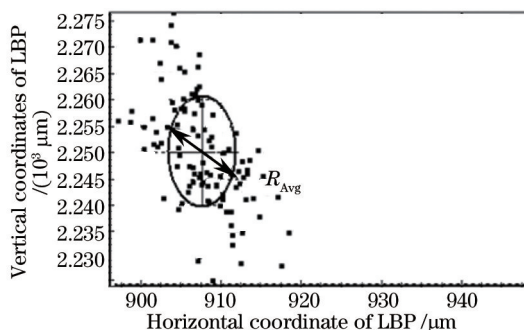


图 11 10 倍扩束后光斑质心散点图

Fig. 11 Scatter diagram of beam centroid after ten times of beam expansion

4 结 论

针对机载无水冷低重复频率工作的激光二极管抽运全固态激光器,设计了双直角棱镜腔,并对其耦合输出特性进行了研究,在此基础上设计出一台适合工程化应用的激光器。当重复频率为 20 Hz 时,激光器输出能量为 60 mJ,脉冲宽度为 11 ns,经过 10 倍扩束后发散角为 0.11 mrad, 30 s 内光轴漂移量小于 5 μ rad。直角棱镜正交放置形成了稳定的谐振腔,极大地改善了光轴稳定度。光轴漂移量指标远小于目前光电平台的跟踪精度和光电平台光轴的不平行度,为未来高照射精度光电平台的工程化应用提供了技术基础。

参 考 文 献

- 1 Zhuang Xinyu, Chen Zhaobing. Current status and its developing trend of semiactive laser guided weapon[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(6): 6-10.
庄昕宇, 陈兆兵. 半主动激光精确制导武器的发展现状与趋势[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(6): 6-10.
- 2 Wang Xiusheng, Niu Yanxiong, Zhang Peng, *et al.* Numerical simulation about effect of target shape on laser range finder's ranging performances[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(11): 28-31.
王秀生, 牛燕雄, 张 鹏, 等. 目标形状对激光测距机测距能力影响的数值模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(11): 28-31.
- 3 Liu Jiayan, Wang Ping, Gan Zhihong, *et al.* Laser irradiation precision analysis of photoelectric platform for high speed unmanned aerial vehicle with scouting and hitting[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 10(29): 1449-1455.
刘家燕, 王 平, 甘至宏, 等. 察打一体高速无人机光电平台激光照射精度分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 10(29): 1449-1455.
- 4 Liu Junhui, Shan Jiayuan, Liu Yongshan. Tracking performance of gyro-stabilized seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2209-2215.
刘俊辉, 单家元, 刘永善. 动力陀螺式导引头跟踪能力分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2209-2215.
- 5 Cheng Yong, Sun Bin, Wang Xiaobing, *et al.* Study on conductive cooling repetitively laser with nil drift optics axis[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 495-497.
程 勇, 孙 斌, 王晓兵, 等. 光轴零漂移的热传导冷却重复频率激光器研究[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 495-497.
- 6 Coyle D B, Kay R B, Stysley P R, *et al.* Efficient, reliable, long-lifetime, diode-pumped Nd:YAG laser for space-based vegetation topographical altimetry[J]. Applied Optics, 2004, 43(27): 5236-5242.
- 7 邓仁亮, 徐荣甫. 军用固体激光器谐振腔[J]. 兵器激光, 1984(2): 54-57.
- 8 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 65-68, 77-169, 371-416.
- 9 Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Science Press, 1978: 73.
波 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 73.
- 10 Shen Jianping, Ding Chunfeng. Characteristic analysis of z-shaped orthogonal Porro-prism resonator[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 283-287.
沈建平, 丁春峰. Z型正交波罗棱镜腔的特性研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 283-287.
- 11 Tan Tianya, Zhan Meiqiong, Tian Guagnlei, *et al.* Development of coatings on the crystals for diode pumped lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(7): 31-34.
谭天亚, 占美琼, 田光磊, 等. 全固态激光器用晶体镀膜的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 31-34.
- 12 王之江, 方洪烈. 直角棱镜谐振腔的共振模[J]. 物理学报, 1975, 24(6): 454-457.