

碱金属激光器蒸气室窗口片的标准具效应研究

王玉洁^{1,2**}, 李志永¹, 谭荣清^{1,2*}, 宁方晋^{1,2}, 郑煜³

¹中国科学院电子学研究所高功率气体激光技术部, 北京 100190;

²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

³北京大学附属中学, 北京 100080

摘要 实验研究了内表面未镀膜的碱金属蒸气室窗口片的标准具效应对激光输出的影响。研究表明:蒸气室两个内表面作为激光输出面时的光斑图样不同,且均伴随有寄生光斑;蒸气室窗口片之间的楔角导致了寄生光斑的产生。将激光器在不同输出耦合率下阈值的实验结果和理论结果进行比较,验证了碱金属蒸气室内表面未镀膜时具有标准具效应,存在多次反射;仅碱金属蒸气室作为输出耦合镜时,标准具效应是输出光斑的主要机制,此时获得了 1.8 W 的铷激光,其光光效率为 10.2%,斜率效率为 15.8%。

关键词 激光光学; 半导体抽运碱金属激光器; 铷蒸气; 蒸气室窗口片; 寄生光斑

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801003

Etalon Effect of Vapor Cell Windows in Alkali Lasers

Wang Yujie^{1,2**}, Li Zhiyong¹, Tan Rongqing^{1,2*}, Ning Fangjin^{1,2}, Zheng Yu³

¹Department of High Power Gas Laser Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³The Affiliated High School of Peking University, Beijing 100080, China

Abstract The influence of the etalon effect on the laser output of the uncoated alkali vapor cell windows on the inner surface is experimentally studied. The research results show that the two inner surfaces have different spot patterns when they are used as the laser output surface, and both of the cases are accompanied by parasitic spots. The parasitic spots are caused by the wedge angle of the two windows of alkali vapor cell. The experimental and theoretical results of the threshold at different output coupling rates are compared. It is verified that the uncoated inner surface of the alkali vapor cell has etalon effect and multiple reflections. When the alkali cell replaces output coupling mirror, the etalon effect is the main factor of the laser output. In this case, the rubidium laser of 1.8 W is obtained, whose optical efficiency is 10.2% and slope efficiency is 15.8%.

Key words laser optics; diode pumped alkali vapor vapor; rubidium vapor; vapor cell window; parasitic spot

OCIS codes 140.3480; 140.1340

1 引 言

半导体抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)自 2003 年被提出^[1]后,因具有光束质量好、量子效率高等优点而获得了国内外的广泛关注。碱金属激光器除了在大功率输出上具有极大潜能^[2]外,在低功率输出上也具有一定的应用前景,如可将其作为无自旋交

换弛豫(SERF)磁力计的泵源^[3]。在低功率碱金属激光器的研究中,常将碱金属单质和缓冲气体充入玻璃吹制的泡体(即蒸气室)中进行实验。为了增强蒸气室对激光的透过率,减小整体腔内的插入损耗,常在蒸气室的表面镀增透膜。2008 年,美国空军学院将线宽为 10 GHz 半导体抽运光双端导入外表面镀膜的碱金属蒸气室中,获得了 17 W 的铷激光输

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-03-06; 录用日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61505212,61775215)、脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2016KF02)

* E-mail: rqtan@mail.ie.ac.cn; ** E-mail: wangyujie15@mails.ucas.edu.cn

出,光光效率为 46%^[4]。碱金属元素的化学性质非常活泼,蒸气室的内表面会和 DPAL 波段增透膜材料中通常采用的氟化物和氧化物在高温下发生化学反应,导致膜层失效和窗口污染。目前,处理这一问题的方法通常有三种:一是蒸气室内表面不镀膜且抽运光和激光均正入射,由于 DPAL 具有高增益的特点,在该条件下仍可获得较好的激光性能。中国科学院电子学研究所采用该类型的碱金属蒸气室在线宽匹配因子(抽运光线宽与碱金属原子 D₂ 线吸收线宽的比值)为 4.2 时获得了 2.8 W 的线偏振铷激光输出,光光效率为 21%^[5]。二是采用布儒斯特角结构的窗口,结合双色膜技术或抽运光掠入射技术实现抽运光和激光的耦合。2016 年中国科学院大连化学物理研究所采用布儒斯特角结构获得了 16.8 W 的铷激光输出,最高光光效率为 35%^[6]。三是在蒸气室内表面镀抗碱金属污染的增透膜。这一技术是新发展的技术。美国的 Allen Scientific Glass 公司自称能够制作这种蒸气室,并可在 4 W 连续的 Cs-DPAL 中应用^[7]。

当蒸气室内表面未镀膜时,由于其前后两窗口片平行,蒸气室内部为甲烷、氦气、碱金属蒸气等气态物质,形成了低锐度的法布里-珀罗(F-P)标准具。这种低锐度的 F-P 标准具可对特定频率的激光进行反射,因此可以直接作为激光器的输出耦合镜使用^[8]。2002 年,吴瑾等^[9]利用 F-P 干涉仪作为输出耦合镜实现了 TEA CO₂ 激光器的选带调谐输出。本文对蒸气室内表面未镀膜形成的标准具效应及蒸气室窗口片之间存在楔角时激光的输出图样进行了研究。

2 基本原理与实验装置

2.1 基本原理

图 1 为内表面未镀膜的铷蒸气室圆柱体结构。根据菲涅耳公式计算得到垂直入射时窗口片的单程反射率为 3.7%,具有两平行窗口的蒸气室此时可看作一个标准具,该效应提高了蒸气室对 795 nm 激光的反射率,其引起的激光透过率变化可由艾里公式表示^[10]:

$$T(\lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2(2\pi d/\lambda)}, \quad (1)$$

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}, \quad (2)$$

式中: λ 为激光波长; R 为内表面对激光的单次反射率; d 为蒸气室长度。图 2 中实线部分是 $R = 3.7\%$ 、 $d = 8$ mm 时透过率随波长的变化曲线。

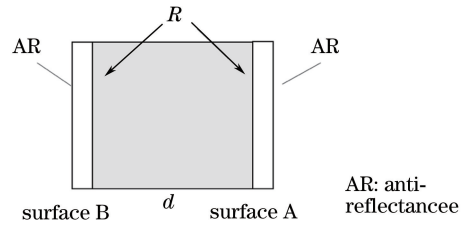


图 1 玻璃吹制的铷蒸气室示意图

Fig. 1 Schematic of glass-blown Rb cell

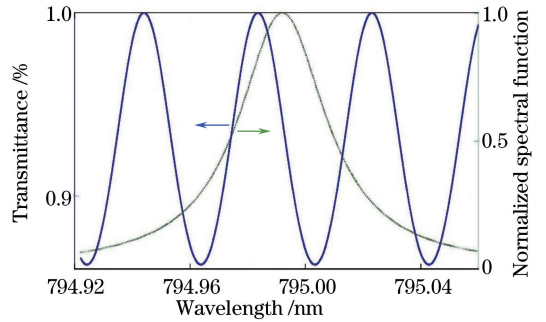


图 2 蒸气室区域内透过率随波长的变化

Fig. 2 Transmittance versus wavelength in the area of steam chamber

铷激光的频率为 377.107 THz,自然线宽为 36.12 MHz。实验中使用的铷蒸气室内部充有 79.8 kPa 的甲烷作为缓冲气体,铷激光谱线经碰撞均匀加宽,甲烷对激光谱线的加宽率为 0.219 MHz/Pa,中心频率漂移率为 -0.0595 MHz/Pa^[11],经计算,在 79.8 kPa 甲烷条件下,其碰撞加宽后的线宽约为 17.6 GHz,中心频率向左漂移 4.75 GHz。此时对应的激光波长为 794.99 nm,线宽为 0.036 nm。图 2 中虚线部分为此时铷原子 D₁ 线的谱线线型。考虑该谱线的线型,求得激光透过率的平均值为 90.2%,即此时蒸气室对激光的平均反射率约为 9.8%。亦即在铷蒸气室标准具效应的作用下,两个窗口片对铷激光的反射得到增强。

2.2 实验装置

利用内表面未镀膜的蒸气室搭建碱金属激光器实验装置,如图 3 所示。半导体泵源(LD)经体布拉格光栅(VBG)压窄后的线宽为 0.13 nm[半峰全宽(FWHM)]^[12],通过控制 VBG 的温度调谐抽运光中心波长至 780.02 nm(铷 D₂ 线在空气中对应的波长)。经过整形和扩束系统后得到近似方光斑,聚焦后焦点处的光斑直径约为 1.1 mm。利用机械斩波器使抽运光在脉冲模式下进行实验,占空比为 10%,频率为 83 Hz,脉冲宽度为 1.2 ms。实验中使

用圆柱体铷蒸气室,其长度为 8 mm,内部充有 79.8 kPa 的甲烷作为缓冲气体,蒸气室工作温度为 160 °C。线偏振的抽运光经由偏振分光立方体 (PBS) 导入蒸气室,铷蒸气室窗口片内表面可与高反射镜(HR)组成谐振腔。

由于该谐振腔内无偏振选择元件,因此产生的激光在 PBS 的透过光路和反射光路中均存在铷激光。在抽运光路中放置双色镜,双色镜对 780 nm 激光高透,对 795 nm 激光高反。在相应位置放置功率计,用于测量激光的功率。

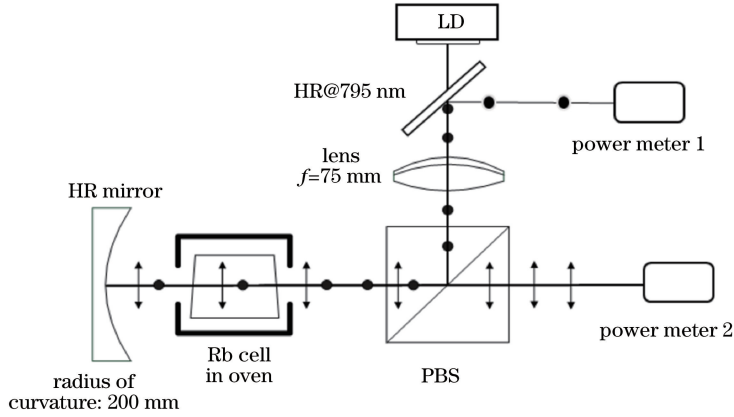


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

3 实验现象及分析

受限于工艺技术,玻璃吹制的碱金属蒸气室的窗口片之间通常不能够严格平行,而是存在楔角,因此会产生多次反射。经测量可知,实验中使用的铷蒸气室两内表面之间的夹角为 34.5 mrad。在这种蒸气室情况下,通常会伴随有寄生振荡。为了区分高反射镜与蒸气室 A、B 窗口片间的谐振,将谐振腔

类型分为谐振腔 A 和 谐振腔 B,分别对这两种情况下的激光输出特性和光斑形貌进行分析。

3.1 谐振腔 A 的激光输出情况

将蒸气室 A 面与高反射镜形成的谐振腔起主要作用时的谐振腔称为谐振腔 A。在该种情形下,激光的主要能量在 A 面输出,激光能量透过窗口片 A 形成主光斑。被 B 面端面反射的能量在透过蒸气室后产生寄生光束。激光光束传播的示意图如图 4 所示。

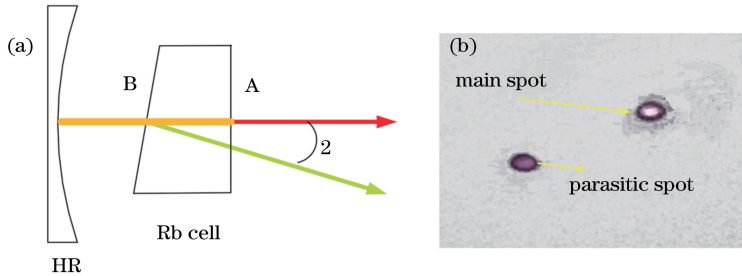


图 4 (a) 谐振腔 A 的激光传播示意图及 (b) 光斑实物图

Fig. 4 (a) Schematic of laser transmission of resonant cavity A and (b) picture of spots

在该谐振腔情况下,主光斑较寄生光斑的模式更好,寄生光斑的纵横比更大,功率较主光斑明显减弱。这主要是由于 A 面和 B 面之间的反射使得激光光斑在楔角方向被拉伸。

3.2 谐振腔 B 的激光输出情况

将蒸气室 B 面与高反射镜形成的谐振腔起主要作用时的谐振腔称为谐振腔 B。在这种情形下,激光的主要能量在 B 面输出。B 面输出的激光经全反镜反射后再次进入蒸气室,之后被功率计或光斑

检测装置接收。谐振腔内部的光束(黄色光线表示)在 A 面和 B 面之间形成多光束干涉传播,被 A 面端面反射的能量在透过蒸气室窗口后产生寄生光束。激光光束传播的示意图如图 5 所示。

与谐振腔 A 相比,谐振腔 B 输出的光斑较多。为了分析谐振腔 B 的光斑的产生机制,使用氦氖光共线指示主光斑的传输。在指示光被窗口片反射的光斑处可以观察到微弱的光斑,即主光斑的寄生光斑。

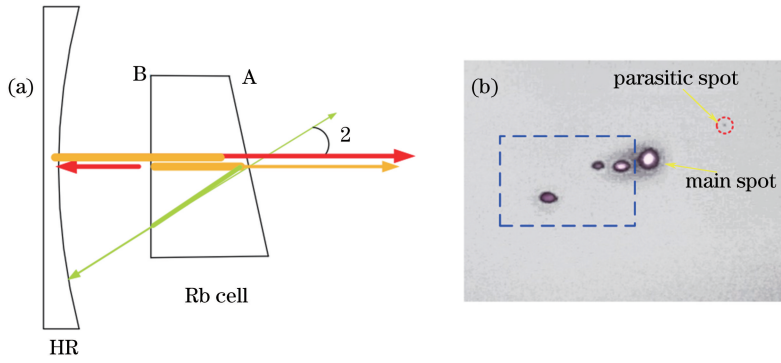


图 5 (a)谐振腔 B 的激光传播示意图及(b)光斑实物图

Fig. 5 (a) Schematic of laser transmission of resonant cavity B and (b) picture of spots

下面进行进一步分析。将透过率为 70% 的平面输出耦合镜放在 PBS 后,形成图 6 所示的谐振腔,对谐振腔 A 形成的光斑进行反馈增强,在高反射镜和输出耦合镜上的光斑如图 6(b)、(c)所示。由图 6(c)可以更加清楚地看到主光斑的寄生光斑。

高反射镜与蒸气室 A 面的距离约为 3.5 cm。根据几何光学可知,在高反射镜上,主光斑和寄生光斑的距离为 1.2 mm。图 6(b)所示的靠近主光斑的光点即为主光斑的寄生光斑。图 6(c)表示的是此时所有的激光输出光斑,右上角的寄生光斑是此时

用共轴指示光寻找到的蒸气室因角度偏折而带来的寄生光斑。观察图 6(c)左下角紧靠主光斑的两个光斑的特征,其与谐振腔 A 的激光输出情况相同,由 A 面与高反射镜谐振产生。图 6(c)左下角距离主光斑约 5 mm 的位置处仍有一光斑,且偏离指示光的角较大,分析认为该类光束的出现主要是由 A 面作为谐振腔输出镜导致的,属于谐振腔中的“鬼线”。需要说明的是,尽管图 6 所示的谐振腔输出了多个光斑,但主光斑的输出功率仍占激光器总功率的 90% 以上。

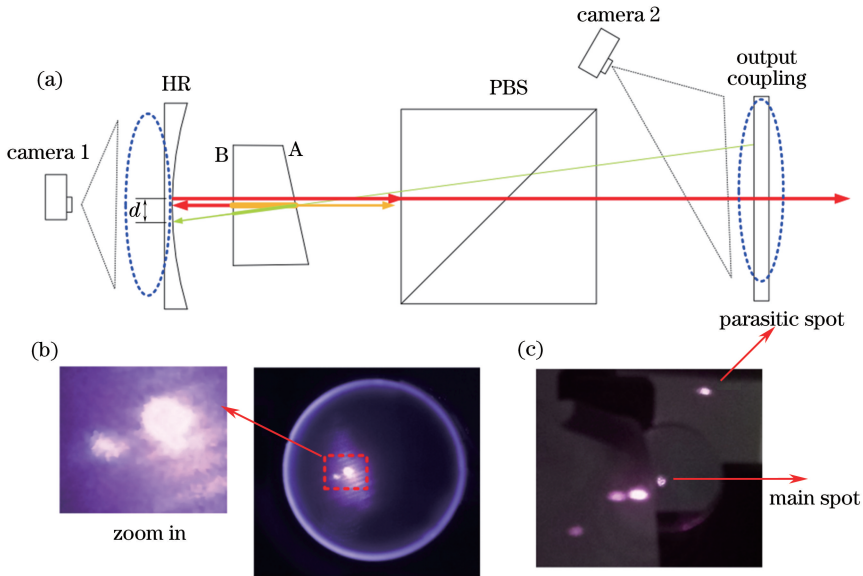


图 6 (a)实验装置示意图;(b)相机 1 所摄图像;(c)相机 2 所摄图像

Fig. 6 (a) Schematic of experimental setup; (b) image taken by camera 1; (c) image taken by camera 2

3.3 分析和讨论

谐振腔 A 的出光情况相对较为简单,结合理论计算对其实验现象进行分析。图 7 是谐振腔 A 情况下功率计 1 和功率计 2 测得的输出功率及总的光光效率。

由图 7 可以看出:谐振腔 A 产生的激光不具有线偏振特性;在不同的抽运功率下,偏振特性不同;在抽运光功率为 17.8 W 时,功率计 1 和功率计 2 测得的铷激光的总功率为 1.8 W,光光效率为 10.2%,斜率效率为 15.8%,激光产生的阈值抽运功率为 6.4 W。

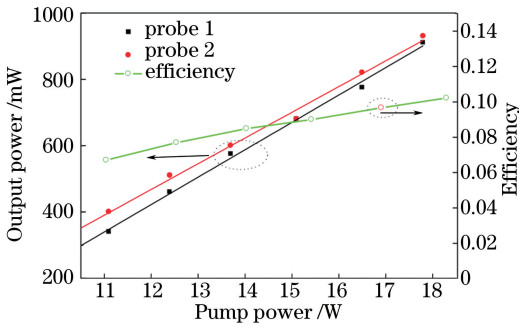


图 7 谐振腔 A 输出的功率随抽运光功率的变化
Fig. 7 Output power of cavity A as a function of pump power

在放置反射率为 30% 的平面输出耦合镜后[位置与图 6(a)所示相同,总腔长为 8.3 cm],在同样的实验条件下,激光器的输出功率曲线如图 8 所示。

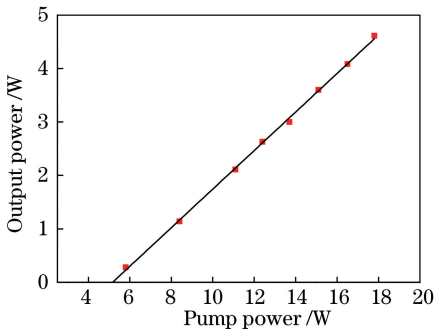


图 8 放置输出耦合镜后的激光功率曲线
Fig. 8 Laser power curve with output coupling mirror

此时,在抽运光功率为 17.8 W 时,能够获得 4.6 W 的铷激光,光光效率为 25.9%,斜率效率为 36.1%,激光产生的阈值抽运功率为 5.1 W。

在该实验参数条件下,采用单端抽运理论模型^[13]得到的铷激光阈值随输出耦合的透过率(即输出耦合率)的变化如图 9 所示。根据计算,未镀膜内表面仅反射一次时,对应的输出耦合率为 96.3%。标准具效应在铷激光中心波长处的反射率为 9.8%,在加入输出耦合镜后,对应的总的输出耦合率约为 63%。图 9 中 A、B、C 三点分别是 63%、90% 和 96% 输出耦合率时的阈值情况。由图 9 可以看出, B 点阈值是 A 点阈值的 1.58 倍, C 点阈值是 A 点阈值的 2.59 倍。实验中,谐振腔 A 对应的阈值为“输出耦合镜+谐振腔 A”时阈值的 1.25 倍。由此可见,在该实验中蒸气室对激光的实际反射率应远大于单程反射率(3.7%)。与 C 点的阈值情况相比, B 点与谐振腔 A 的实际情况更相似。可见,标准具效应提高了蒸气室的反射率,是蒸气室作为输出耦合镜时激光产生的主要原因。

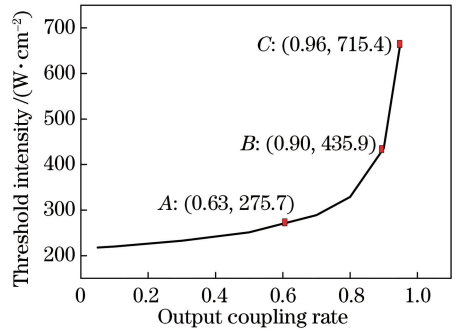


图 9 理论计算的不同输出耦合率下的阈值抽运功率密度
Fig. 9 Theoretically calculated threshold pump power density at different output coupling rates

4 结 论

详细研究了碱金属蒸气室内表面未镀膜对碱金属激光输出的影响。认为碱金属蒸气室两个未镀膜的内表面与内部的缓冲气体形成了标准具,多次反射光束相干,在铷激光的谱线宽度内平均反射率为 9.8%。该效应使得未镀膜内表面作为激光输出面与高反射镜谐振,产生激光。两个内表面分别与高反射镜谐振时,因蒸气室窗口之间存在楔角,故而光斑输出图样存在较大差别。基于单端抽运理论模型对不同输出耦合率下激光器的阈值情况和实验中激光器的阈值情况进行了定量分析,验证了蒸气室窗口片内表面未镀膜时存在标准具效应。碱金属蒸气室作为输出耦合镜时,获得了 1.8 W 的铷激光,光光效率为 10.2%。将窗口片内表面未镀膜的碱金属蒸气室作为输出镜使用时,可产生标准具效应。利用该效应设计的碱金属激光器具有结构简单的特点,可有效解决碱金属蒸气室窗口片不镀膜带来的不利影响。

参 考 文 献

- [1] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, *et al.* Resonance transition 795-nm rubidium laser [J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.
- [2] Pitz G A, Guild E M, Hostutler D A. Advancements in flowing diode pumped alkali lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9729: 972902.
- [3] Han G C, Li Z Y, Tan R Q, *et al.* Output properties of self-heated alkali laser with min vapor cell[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601002.
韩高策,李志永,谭荣清,等.短蒸气室自加热碱金属激光器输出特性[J].中国激光,2017,44(6): 0601002.

- [4] Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, *et al.* Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(5): 414-415.
- [5] Xu C, Tan R Q, Li Z Y, *et al.* 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0102009.
徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102009.
- [6] Tan Y N, Li Y M, Liu T, *et al.* 16.8 W diode pumped rubidium vapor laser with Brewster angle structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0302004.
谭彦楠, 李义民, 刘通, 等. 布儒斯特角结构 16.8 W 半导体抽运铷蒸气激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0302004.
- [7] Zhdanov B V, Venus G, Smirnov V, *et al.* Continuous wave Cs diode pumped alkali laser pumped by single emitter narrowband laser diode[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(8): 083104.
- [8] Xue J W, Pei X D, Su B H, *et al.* Study of F-P etalon using in laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 031402.
薛竣文, 裴雪丹, 苏秉华, 等. 激光器中 F-P 标准具的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 031402.
- [9] Wu J, Wan C Y, Wan P, *et al.* TEA CO₂ laser tuned by low fineness Fabry-Pertot interferometer[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(4): 349-351.
吴谨, 万重怡, 万朋, 等. 低锐度 F-P 干涉仪调谐的 TEA CO₂ 激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2002, 13(4): 349-351.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999: 299-308.
玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999: 299-308.
- [11] Rotondaro M D, Perram G P. Collisional broadening and shift of the rubidium D₁ and D₂ lines ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}, 5^2P_{3/2}$) by rare gases, H₂, D₂, N₂, CH₄ and CF₄ [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1997, 57(4): 497-507.
- [12] Li Z Y, Tan R Q, Xu C, *et al.* Linewidth-tunable laser diode array for rubidium laser pumping [J]. *Quantum Electronics*, 2013, 43(2): 147-149.
- [13] Li L, Tan R Q, Xu C, *et al.* Analysis on threshold characteristics of diode pumped rubidium vapor lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(2): 20-26.
李琳, 谭荣清, 徐程, 等. 半导体泵浦铷蒸气激光器阈值特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(2): 20-26.