

太阳光抽运激光器抽运系统优化

徐 鹏 杨苏辉 赵长明* 张海洋 钱燕雷 郝嘉胤 何 滔 王华昕

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 太阳光抽运激光器中, 抽运系统提供的太阳抽运光与激活晶体之间的耦合决定了激光输出的总体效率。使用 Tracepro 软件, 建立了菲涅耳透镜、锥形抽运腔二级抽运系统模型, 并对该系统进行优化。通过分析菲涅耳透镜焦斑能量沿轴线的分布, 得到了锥形腔入射窗口的口径和窗口距菲涅耳透镜的距离。通过改变锥形抽运腔的腔长和锥度, 分析晶体棒轴向抽运功率密度分布, 得到了锥形腔的最佳结构, 并对镜面反射腔和陶瓷腔进行了详细的介绍。

关键词 激光器; 太阳光抽运激光器; 菲涅耳透镜; 锥形抽运腔; Tracepro 软件

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0114002

Optimization of Pumping System in Solar Pumped Laser

Xu Peng Yang Suhui Zhao Changming Zhang Haiyang Qian Yanlei

Hao Jiayin He Tao Wang Huaxin

(*Optoelectronics School, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract The coupling between solar light radiation and laser rod medium in a solar pumped laser affects the efficiency of the laser. To optimize the pumping system, simulation of the two-stage pumping system with a Fresnel lens and a conic pumping cavity is carried out with Tracepro software. According to the power density distribution along the axis at focal place of the Fresnel lens, the diameter and position of the pumping cavity window and the distance of the window from the Fresnel lens are optimized. The power density distributions along the laser rod axis of different cavity lengths and different cavity tapers are also analyzed. The optimal structure of taper cavity is obtained. The mirror reflecting cavity and ceramic cavity are introduced in detail.

Key words lasers; solar pumped laser; Fresnel lens; conic pumping cavity; Tracepro software

OCIS codes 140.3460; 220.1770; 140.5560; 080.4298

1 引 言

太阳光抽运激光器是以太阳辐射为抽运源, 将太阳光转化为激光的装置。其结构简单, 转换环节少, 可实现较高的太阳光到激光的转换效率, 在通信、能源和军事等领域有很大的应用前景。

由于抽运光为太阳光, 功率密度不足, 需要对太阳光会聚才能获得足够的功率密度来实现激光输出。直接采用成像光学系统将太阳光会聚后直接来抽运激光介质会引起极大的抽运不均匀性, 因此需要引入抽运腔, 以达到对晶体的均匀抽运。1966 年,

Young^[1]采用抛物面反射镜会聚太阳光, 通过耦合系统, 把太阳光耦合进柱形腔, 侧面抽运 Nd:YAG 晶体获得了 1 W 的连续激光输出。1988 年, Weksler 等^[2]使用定日镜和抛物面反射镜会聚太阳光, 进入二维复合抛物面聚光器 (2D-CPC) 抽运腔中, 侧面抽运 Nd:YAG 晶体获得了 60 W 的稳定激光输出。2003 年, Lando 等^[3]用抛物反射镜会聚太阳光, 再通过 3D-CPC 抽运腔会聚, 最后进入 2D-CPC 抽运腔中, 侧面抽运 Nd:YAG 晶体获得了 45 W 的稳定激光输出。2008 年, Ohkubo 等^[4]采用菲涅耳透镜会聚太阳光,

收稿日期: 2012-08-06; 收到修改稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(60978029)资助课题。

作者简介: 徐 鹏(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事新型固体激光器方面的研究。E-mail: experfect@yahoo.cn

导师简介: 杨苏辉(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事固体及光纤激光器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

进入金属锥形腔,端面和侧面混合抽运 Nd:YAG 晶体获得了 80 W 的稳定激光输出。本课题组使用菲涅耳透镜、锥形抽运腔二级抽运系统抽运 Nd:YAG 晶体棒,获得激光输出,并使用陶瓷锥形腔代替金属腔,增大了激光输出功率。

菲涅耳透镜因其色散特性,导致会聚效率无法达到 100%,但由于其制作成本低,重量轻等因素,在太阳光抽运激光器的应用中仍有较大优势;抛物面反射镜虽然没有色散特性,但其制作精度要求高、成本大。2D-CPC 抽运腔可以获得较好的轴向抽运均匀性但无法保证环向均匀性,锥形抽运腔可以实现端面 and 侧面混合抽运,有效提高激光输出功率,且其轴对称特性很好地保证了环向抽运均匀性,其缺点是轴向抽运均匀性较差。实验中发现,菲涅耳透镜的焦点在锥形聚光腔中的位置和锥形腔尺寸的选择对激光输出有较大影响。已有的文献中大多侧重于对实验结果的报道,没有对会聚系统进行系统研究和优化。本文基于菲涅耳透镜、锥形抽运腔二级抽运系统,用 Tracepro 软件进行建模、分析,获得了菲涅耳透镜、锥形抽运腔的会聚特性,得出了菲涅耳透镜焦点位置和锥形腔尺寸与激光输出的关系。通过改变锥形腔位置和几何参数,对抽运系统进行优化,找出了解决锥形腔轴向抽运不均匀的有效手段,部分结论经过了实验验证。该模型的建立为抽

运系统改进提供了理论依据。

2 抽运系统模型建立

基于菲涅耳透镜、锥形抽运腔的二级抽运系统包括太阳光源、菲涅耳透镜、锥形抽运腔、腔内冷却液和晶体棒。太阳光抽运激光器结构示意图如图 1 所示。

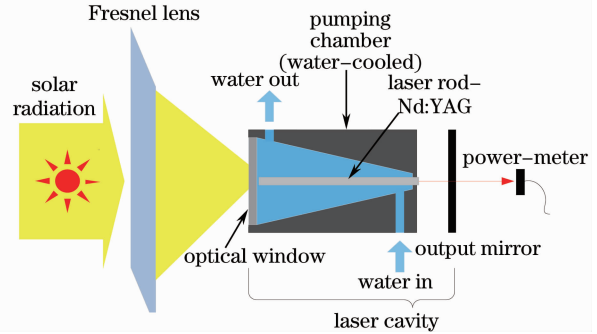


图 1 太阳光抽运激光器实验装置示意图
Fig. 1 Schematic view of experimental setup of solar pumped laser

太阳光源功率密度为 1365 W/m^2 , 光谱为 AM0 太阳光谱, 光线发散角为 0.533° 。菲涅耳透镜使用的是日本特殊光学树脂株式会社提供的 CF1200-B3 型号产品, 其材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 焦距为 1200 mm, 环距为 0.33 mm, 厚度为 3 mm, 通光面面型为直径 1m 的圆, PMMA 色散方程为^[5]

$$N(\lambda)^2 = 2.399964 - 8.308636 \times 10^{-2} \lambda^2 - 1.919569 \times 10^{-1} \lambda^{-2} + 8.720608 \times 10^{-2} \lambda^{-4} - 1.666411 \times 10^{-2} \lambda^{-6} + 1.169519 \times 10^{-3} \lambda^{-8}, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, $N(\lambda)^2$ 为相应波长的材料折射率。由于厚度较小, 菲涅耳透镜对太阳光的吸收可以忽略, 因此 PMMA 材料吸收系数设为 0。

锥形腔和腔内冷却液可以简化设置为一个整体。锥形腔反射面可以为金属反射面和陶瓷反射面; 冷却液材质为水, 其色散方程和吸收光谱软件自带。模型未考虑冷却液流动带来的影响。

晶体侧面为打磨的毛面, 对抽运光存在散射, 可在 Tracepro 软件的 Abg 模型中选定参数, 设定面型。晶体棒材质为 Nd:YAG, 其色散方程近似为 YAG 色散方程^[6]:

$$N(\lambda)^2 - 1 = \frac{2.282\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01185} + \frac{3.27644\lambda^2}{\lambda^2 - 282.734}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长, $N(\lambda)^2$ 为相应波长的材料折射率。材料吸收系数按照 Nd:YAG 吸收谱选定。

3 抽运系统模型分析与实验验证

3.1 菲涅耳透镜性能分析与测试

菲涅耳透镜作为一种透射式聚光器件, 镜体 PMMA 材料的色散特性会导致不同波长光的会聚焦点在轴向位置上不同。用 10^5 条模拟太阳光线追迹菲涅耳透镜, 可以得出不同波长会聚焦点位置如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 短于 300 nm 的光线未被会聚。菲涅耳透镜中材料对于短波长光线的折射率较大, 受菲涅耳透镜刻痕限制, 光线会出现全反射现象。小于 300 nm 波段的光大部分会在菲涅耳透镜中多次反射, 最终会被反射, 透过的部分也无法会聚, 300~400 nm 的光线在离轴距离较大时也会出现该现象。紫外部分光线未聚焦, 有效地减少了紫外光线造成的热吸收和其对晶体的损伤, 但紫外光

线在非涅耳透镜中多次反射会对透镜材料造成了一定损伤。

表1 Fresnel透镜对不同波长的会聚焦距
Table 1 Focal length of the Fresnel lens at different wavelengths

Wavelength /nm	Average focal length /mm
<200	no focus
200~300	no focus
300~400	898
400~500	1185
500~600	1205
600~700	1220
700~800	1230
800~900	1236
900~1000	1239
>1000	>1250

表1还表明:波长越长,经菲涅耳透镜会聚后焦距越长。对于宽光谱的太阳光来说,可按照接收光强大小选取锥形腔窗口位置。实验中一般使用的锥形腔窗口直径为30 mm,图2为模拟的不同位置处直径为30 mm的窗口接收的能量分布。

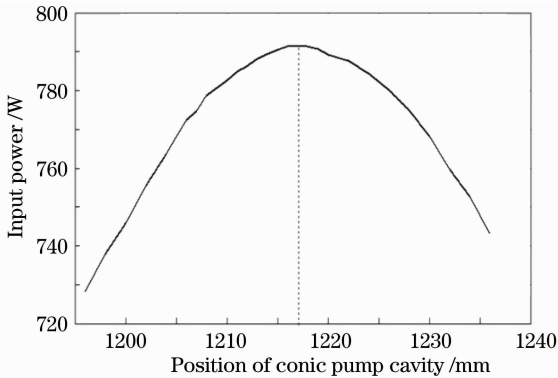


图2 窗口位置与接收功率关系图

Fig. 2 Relationship between window position and detected power

图2表明在1217 mm处接收光强最大。实验装置中锥形腔窗口位置在距菲涅耳透镜1200 mm处,调整范围为-25~25 mm。实验中发现焦距为1225 mm处激光输出比1217 mm处大。这是由于Nd:YAG材料对0.75 μm 、0.81 μm 抽运带吸收最强^[7],锥形腔窗口位置可选取为距菲涅耳透镜1230 mm处。

图3为直径60 mm的窗口在焦点为1217 mm处得到的光强分布图,接收的总光强为875.85 W,会聚效率为81.63%。图中口径大于直径40 mm处的光强分布很小,若继续增加窗口接收口径,接收的光强增加不大。直径30 mm的窗口接收的总光

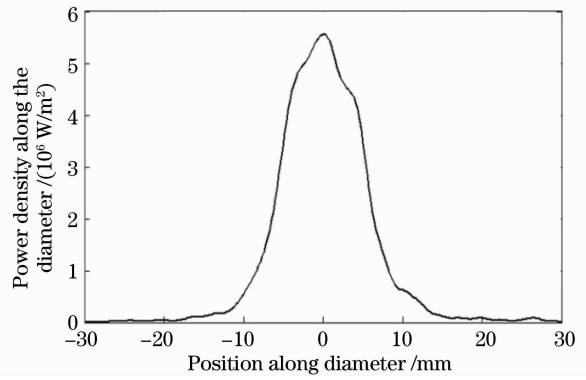


图3 模拟会聚光斑的功率空间分布

Fig. 3 Distribution of simulated focused sunlight power
强为791.5 W,占直径60 mm的窗口接收光强的90.37%。而增大锥形腔窗口,会增大通过窗口溢出的抽运光,因此选取直径30 mm的锥形腔窗口较为合适。

3.2 锥形抽运腔性能分析与测试

锥形抽运腔的作用是将抽运光高效、均匀地耦合到工作物质上。耦合效率和均匀性是评价锥形抽运腔的两个重要标准。

本课题组在2011年发表的研究成果中^[8],在抽运腔内用石英管代替激光棒放置在腔轴线上,使用热电偶在管内测量抽运腔轴线上的温度分布。软件建立的模型中晶体材料为石英,侧面设置为无散射面,输出晶体棒侧面光强分布,可以模拟此测量方法。图4为用此方法测得的温度分布和软件模拟得出的光强分布情况对比。

由图4(a)和(b)可得,测得的温度分布和模拟得出的光强分布的变化趋势基本一致。实验数据中由于热电偶接触到石英管顶端,导致所测温度偏高,使得前端的温度变化趋势与模拟的光强变化趋势不一致。图4(a)中模拟的光强趋势比测量的趋势集中,是因为实验中金属腔镀金面难以加工成理想的镜面反射面,存在一定比例的散射。图4(b)中模拟结果与实验结果基本符合。因此,锥形腔模型能有效地模拟实验情况。

把晶体材料设置成Nd:YAG,侧面设置为打磨的毛面,可以模拟晶体棒轴向抽运功率密度分布。图5为入射口径为30 mm,出射口径为8 mm,长度为100 mm的金属腔和陶瓷腔的轴向抽运功率密度分布。由于晶体材料不同和侧面面型不同,图中的抽运光分布与用热电偶测得的温度分布差别较大。实验中发现,同等情况下陶瓷腔激光输出功率比金属腔稍大,根据图5分析可知,若取抽运阈值功率密

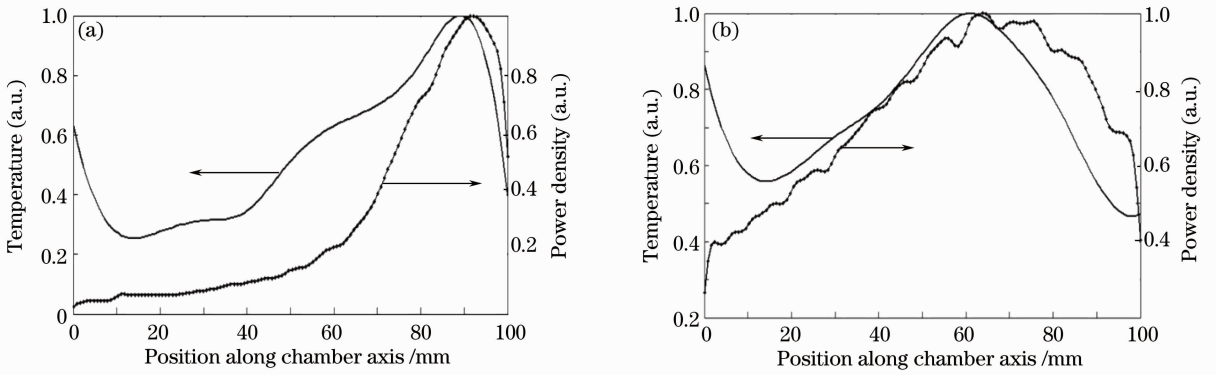


图 4 抽运腔中温度分布和模拟光强分布对比图。(a)镀金腔；(b)陶瓷腔

Fig. 4 Temperature distribution and simulated power-density distribution along the axes of the cavity in (a) gold-coated cavity and (b) ceramic cavity

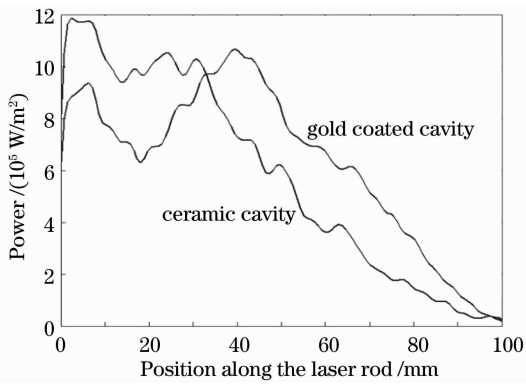


图 5 镀金腔和陶瓷腔中轴向模拟光强分布对比

Fig. 5 Comparison of simulated power distributions along the axis of gold-coated cavity and ceramic cavity

度为 $7 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ，陶瓷腔中太阳光能量密度超过抽运阈值晶体长度大于金属腔中的相应长度以致金属腔激光输出功率减小。同时实验中出现的环状激光光斑也说明晶体中一些区域的抽运功率密度不足，

影响了激光输出。因此，提高抽运功率密度是需要解决的重要问题。从图中可以看出金属腔和陶瓷腔的后端抽运光分布都较少，部分长度晶体的抽运光功率密度不足，激光未能起振，造成了抽运光的浪费，影响了抽运效率。若减少腔长，使后端未利用的抽运光重新分布在晶体前段，增加前端抽运功率密度，则可以提高抽运光利用率。实验中，使用入射口径为 30 mm，出射口径为 8 mm，长度为 100 mm 的陶瓷锥形腔型，获得了 9.8 W 的激光输出；在相同情况下，使用入射口径为 30 mm，出射口径为 8 mm，长度为 85 mm 的陶瓷锥形腔型，获得了 12.3 W 的激光输出。实验证明，减小腔长，可以有效地增加激光输出功率。

用 Tracepro 软件建立的模型中，通过改变锥形腔长度，获得了相应模型的晶体棒轴向抽运光分布如图 6 所示。

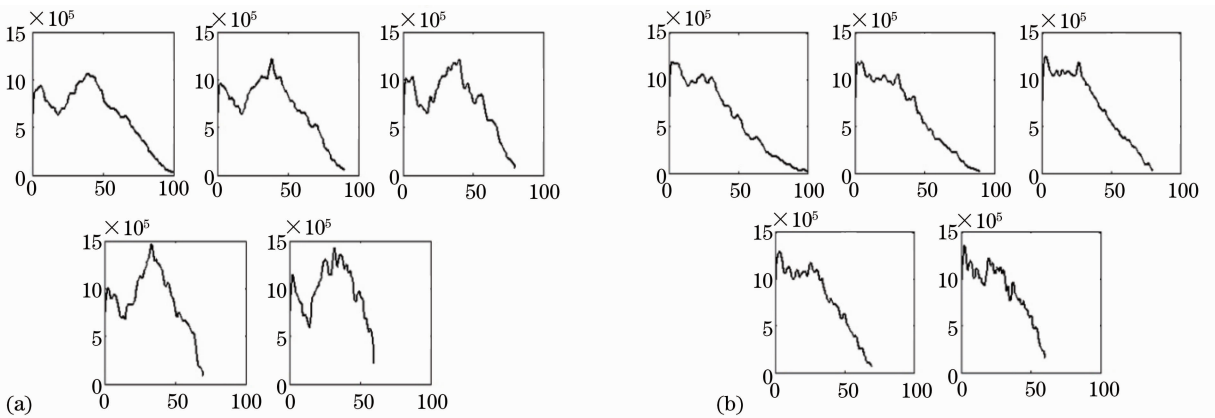


图 6 不同腔长镀金腔(a)和陶瓷腔(b)中轴向模拟光强分布图

Fig. 6 Simulated power-density distributions along the axes of (a) gold-coated cavity and (b) ceramic cavity at different cavity lengths

图 6(a) 为入射口径为 30 mm, 出射口径为 8 mm, 长度分别为 100、90、80、70、60 mm 的金属腔的晶体棒轴向抽运功率密度分布, 图 6(b) 为相应陶瓷腔的晶体棒轴向抽运功率分布。从图 6 中可以看出, 减小腔长, 有效地增加了抽运段功率密度。在饱和抽运功率密度范围内, 减小腔长可以增加激光输出功率。

另外, 模拟中还发现减小锥形腔锥度可以增加由腔体反射到腔后端的抽运光, 增加抽运光均匀性。模型中, 通过改变后端口径, 改变锥形腔锥度。选取长度为 75 mm, 入射口径为 50 mm, 后端口径分别为 8、12、16、20、24、30 mm, 得出相应晶体棒轴向抽运功率密度分布如图 7 所示。

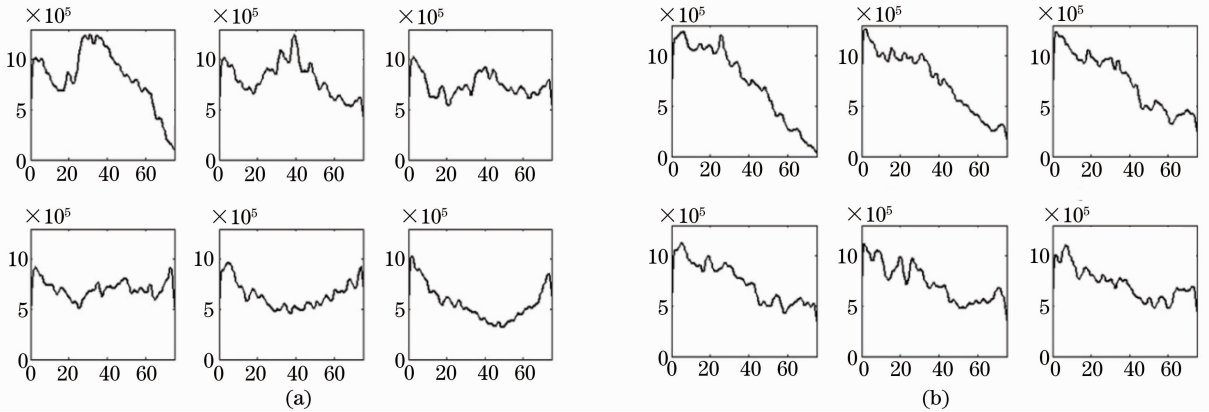


图 7 不同后端口径镀金腔(a)和陶瓷腔(b)中晶体轴向光强模拟分布

Fig. 7 Simulated power-density distributions along the axis of (a) gold-coated cavity and (b) ceramic cavity at different end apertures

图 7(a) 表明, 对于镀金的反射腔, 减小锥度可以一定程度增加抽运光均匀性, 但会减少入射抽运光总量。减小锥度会减少抽运光在腔内反射次数, 导致从窗口溢出的抽运光增加, 因此金属腔中需综合考虑抽运光均匀性和抽运光总量。图 7(b) 中可以看出对于陶瓷腔, 减小锥度增加了抽运光均匀性, 且抽运光总量基本保持不变。对于陶瓷腔来说, 可以选择柱形腔型。

减小锥度可以增加抽运光均匀性且几乎不影响抽运光总量, 可以选择柱形腔。

4 结 论

使用 Tracepro 软件, 建立了菲涅耳透镜、锥形腔二级抽运系统模型, 并分析了菲涅耳透镜性能和锥形腔性能, 针对金属锥形腔和陶瓷锥形腔, 研究了锥形腔的入射窗口尺寸、窗口位置、腔长、锥度与抽运光功率密度和均匀性的关系, 为抽运系统改进提供了理论依据。通过分析菲涅耳透镜性能, 选取锥形腔入射窗口口径为 30 mm, 窗口位置为距菲涅耳透镜 1230 mm 处。在模型中, 通过改变锥形腔长度和后端口径, 分析晶体棒轴向抽运功率密度分布可得, 减小抽运腔长可以有效地增加抽运功率密度, 在饱和抽运功率密度范围内, 可以提高激光输出功率; 对于金属腔, 减小锥度, 增加了抽运光均匀性, 但减少了抽运光总量, 不宜过大减小锥度; 对于陶瓷腔,

参 考 文 献

- 1 C. G. Young. A sun-pumped CW one-watt laser[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(6): 993~998
- 2 M. Weksler, J. Schwartz. Solar-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6): 1222~1228
- 3 M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin *et al.*. A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(1-6): 371~381
- 4 T. Ohkubo, T. Yabe, K. Yoshida *et al.*. Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 175~177
- 5 S. N. Kasarova, N. G. Sultianova, C. D. Ivanov *et al.*. Analysis of the dispersion of optical plastic materials[J]. *Optical Material*, 2007, **29**(11): 1481~1490
- 6 M. Bass, C. Decusatis, J. Enoch *et al.*. Handbook of Optical: Optical Properties of Materials, Nonlinear Optics, Quantum Optics[M]. New York: McGraw-Hill Prof Med/Tech, 2009. Chapter 2
- 7 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl.. 5th Edition, Beijing: Science Press, 2002. 41~43
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 第 5 版. 北京: 科学出版社, 2002. 41~43
- 8 Luo Pingping, Liu Cheng, Xu Peng *et al.*. Solar pumped Nd:YAG lasers with Fresnel lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1002002
罗萍萍, 刘诚, 徐鹏等. 使用菲涅耳透镜的太阳光抽运 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1002002