

文章编号: 0258-7025(2009)01-0028-05

全固态 447 nm 连续激光器

李景照¹ 朱海永² 陈振强¹ 张 戈² 黄呈辉² 魏 勇² 韩永飞¹ 陈 哲¹ 李 真¹

(¹ 暨南大学光电工程研究所, 广东 广州 510632
² 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002)

摘要 报道了一台采用激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAP 晶体的全固态腔内三倍频 447 nm 连续(CW)蓝光激光器。对几种常用的晶体进行分析对比后,选取 Nd:YAP 晶体作为增益介质产生 1341.4 nm 基频光,腔内采用 I 类临界相位匹配(CPM)LBO 晶体进行倍频(SHG)产生 670.7 nm 波长激光,基频光与倍频红光再经 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体和频(SFM)获得 447.1 nm 蓝光输出。采用四镜折叠腔结构,通过谐振腔稳定性分析,优化选取了合适的谐振腔参数。实验对比了不同腔长的输出特性,最终在 534 W 抽运功率下,获得了最大功率为 114 mW 的连续 447.1 nm 蓝光输出,光-光转换效率为 0.02%,并分析了效率低的原因。

关键词 激光器;蓝光激光器;腔内三倍频;侧面抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0028

All-Solid-State Continuous-Wave Laser at 447 nm

Li Jingzhao¹ Zhu Haiyong² Chen Zhenqiang¹ Zhang Ge²

Huang Chenghui² Wei Yong² Han Yongfei¹ Chen Zhe¹ Li Zhen¹

¹Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

²Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract A laser-diode (LD) side-pumped Nd:YAP all-solid-state intracavity frequency-tripled 447 nm continuous-wave (CW) blue laser was reported. After analysis and comparison of several optical crystals, Nd:YAP was chosen as the gain medium to generate 1341.4 nm fundamental laser. Inside the cavity, a type I critical phase matching (CPM) LBO crystal was used for 670.7 nm second harmonic generation (SHG), and a type II CPM KTP was used for sum frequency mixing (SFM) of the 1341.4 nm and 670.7 nm radiation to generate 447.1 nm blue light. By using a four-mirror folded-cavity resonator, the parameters of laser cavity were optimized and selected according to cavity stability analysis. Output characteristics of different cavity lengths were studied by experiment. The output power of 447.1 nm CW blue laser reached 114 mW at the incident pump power of 534 W, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of 0.02%, and the causes of low efficiency were analyzed.

Key words lasers; blue laser; intracavity frequency tripling; side-pumped

1 引 言

全固体蓝光激光器因其性能稳定、小型化、高效率、长寿命等优点而逐渐受到激光显示、医疗美容、信息存储、海洋通信等领域的重视,并不断实现其应用^[1]。获得高功率、高光束质量的蓝光输出有两种主要方法:一种是利用掺钕激光介质中 Nd³⁺ 离子的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 准三能级跃迁产生的 0.9 μm 波段激光进行腔内倍频(SHG),这是获得蓝光激光最便捷的

方法,目前已经有大量报道^[2~6],其中长春理工大学 2006 年获得了 6.2 W 的 456 nm 连续蓝光输出^[6]。而另一种方法是利用 Nd³⁺ 离子的 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 四能级跃迁产生的 1.3 μm 激光通过腔内三倍频(THG)产生蓝光激光。虽然 THG 与 SHG 相比效率低,但是 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 四能级跃迁具有更低的阈值,较大的发射面积,而且受热效应影响较小。目前国内外已有不少文献对三次谐波调 Q 准连续蓝光

收稿日期:2008-02-28;收到修改稿日期:2008-04-22

基金项目:广州市科技攻关项目(2006Z3-D0111)资助课题。

作者简介:李景照(1983—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器的研究。E-mail:ljzhemail@163.com

导师简介:陈振强(1965—),男,教授,目前研究方向为固体激光器和相关晶体材料的研究。E-mail:tzqchen@jnu.edu.cn

激光器进行了报道^[7-9], 其中中国科学院物理所 2006 年获得了高重复频率、窄脉宽的 440 nm 激光的脉冲输出, 平均功率达到 7.6 W^[7]。然而对三次谐波连续蓝光激光器的报道较少。

本文采用大功率激光二极管(LD)侧面抽运四镜折叠腔结构, 利用 Nd:YAP 晶体作为增益介质, 选用 I 类临界相位匹配 LBO 和 II 类临界相位匹配 KTP 分别进行腔内倍频与和频, 在 534 W 抽运功率下, 获得了最大输出功率为 114 mW 的连续 447 nm 蓝光激光, 相应的光-光转换效率为 0.02%, 并对转换效率低的主要原因进行了分析。

2 晶体的选择

2.1 激光晶体

实验中所用的 1.3 μm 波段基频光是由 Nd:

表 1 几种掺钕离子激光晶体 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁的参数和晶体热导率的对比

Table 1 Comparison of ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ transition parameters and thermal conductivity of several Nd-doped laser crystals

Crystals	Nd:YAP	Nd:YAG	Nd:GdVO ₄	Nd:YLF	Nd:YVO ₄
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ /nm	1341.4	1338/1318	1341.3	1313	1342
Lifetime / μs	150	230	100 (or 90)	480	99 (or 95)
$\sigma / (\times 10^{-19} \text{ cm}^2)$	2.2	0.87/0.92	1.8	0.6	6.0
$\sigma\tau / (\times 10^{-19} \mu\text{s} \cdot \text{cm}^2)$	330	207/211.6	180	288	594
Thermal conductivity / (W/(cm · K))	11	14	11.7	6.3	5.2

表 2 KTP 和 LBO 对 1341.4 nm 倍频的匹配参数

Table 2 Phase matching parameters of KTP and LBO for 1341.4nm SHG

Crystals	KTP	LBO	LBO
Phase matching type	CPM II (300 K)	CPM I (300 K)	CPM II (300 K)
PM angle (θ, φ)	58.9°, 0°	86.1°, 0°	3.6°, 0°
$d_{\text{eff}} / (\text{pm/V})$	3.07	0.817	0.645
Walk-off angle /mrad	44.29	3.46	3.06
Accept angle / (mrad · cm)	1.69	12.11	24.8

表 3 KTP 和 LBO 和频的匹配参数

Table 3 Phase matching parameters of KTP and LBO for SFM

Crystals	KTP	LBO	LBO
Phase matching type	CPM II (300 K)	NCPM II (455 K)	CPM II (300 K)
PM angle (θ, φ)	78.7°, 0°	0°, 0°	15.5°, 0°
$d_{\text{eff}} / (\text{pm/V})$	4.04	0.687	0.586
Walk-off angle /mrad	21.83	0	12.61
Acceptance angle / (mrad · cm)	1.66	Large	2.92

2.2 非线性光学晶体

选择非线性激光晶体时, 晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、接收角等参数都是要考虑的, 它们一方面决定着对倍频晶体的切割角度和长度的选取, 另一方面也影响到激光谐振腔的设计。分别计算了 KTP 和 LBO 晶体对 1341.4 nm

YAP 的 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁产生的。激光晶体的受激发射截面 σ 和荧光寿命 τ 的乘积与激光输出功率成正比, 与激光阈值成反比, 表 1 给出了各掺钕激光晶体 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁的参数和晶体热导率的对比^[10]。从表中看出, Nd:YAP 晶体中 Nd^{3+} 的 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 跃迁的受激发射截面 σ 为 $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 是 Nd:YAG, Nd:YLF 等晶体同一跃迁受激发射截面的 2.4 倍以上, 它的 σ 与 τ 的乘积在这些晶体中也是较大的, 仅比 Nd:YVO₄ 小。虽然 Nd:YVO₄ 晶体有更好的受激发射性能, 但由于其热导率低而限制了在高功率抽运下的使用^[11]。而 Nd:YAP 的热导率与 Nd:YAG 接近, 所以 Nd:YAP 晶体是实现低阈值、高功率的 1341.4 nm 连续激光运转的优良材料, 比其他晶体更适合于高功率 LD 侧面抽运的 1.3 μm 波段激光。

倍频与和频的匹配参数, 对比如表 2 和表 3。

由表 2 可以看出, 对 1341.4 nm 倍频时, KTP 的有效非线性系数 d_{eff} 最大, 但其走离角也非常大, 是 LBO 的 15 倍左右, 有效作用长度很短。LBO 的有效非线性系数较小, 但其走离角也很小, 而允许角度很大, 因此有效作用长度变得很长, 这样意味着可

以通过增加晶体长度来增加倍频转换效率。而且 LBO 晶体比 KTP 有更高的损伤阈值也有利于通过提高基频光功率以提高倍频转换效率。因此实验中采用了 I 类临界相位匹配 LBO 来实现 1341.4 nm 倍频得到 670.7 nm 红光。

表 3 所示为 KTP 和 LBO 分别用于 1341.4 nm 与 670.7 nm 和频的匹配参数。非临界相位匹配 (NCPM) LBO 没有走离效应, 允许角度范围很大, 然而非临界相位匹配对温度很敏感, 而且要控制在 455 K 高温下工作, 这给应用带来了困难。KTP 的有效非线性系数最大, 是 LBO 的 6 倍以上, 然而 KTP 具有大的走离角和小的允许角, 因此 CPM II KTP 和 CPM II LBO 各有优势。通过实验发现, 使用 KTP 和频得到的蓝光功率更高。

3 实验装置与腔结构分析

3.1 实验装置

为了充分利用抽运能量和提高频率转换效率, 采用了图 1 所示的 LD 侧面抽运四镜折叠谐振腔结构。端镜 M_1 是平平镜, 内镜面镀 1341.4 nm 高反膜 ($R > 99.9\%$)。折叠镜 M_2 是平凹镜, 曲率半径为 300 mm, 凹面镀 1341.4 nm 高反膜 ($R > 99.7\%$)。输出镜 M_3 是曲率半径为 150 mm 的平凹镜, 凹面镀 1341.4 nm 高反膜 ($R > 99.7\%$) 和 447 nm 增透膜 ($T > 92\%$)。端镜 M_4 是曲率半径为 150 mm 的平凹镜, 凹面镀 1341.4 nm ($R > 99.8\%$) 和 671 nm ($R > 95\%$) 高反膜。为了抑制 1079 nm 强谱线, M_1 与 M_2 都镀上 1079 nm 增透膜 ($T > 70\%$)。

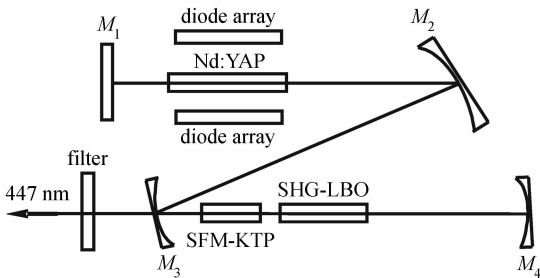


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

实验采用的抽运源是北京国科世纪激光技术有限公司的半导体激光侧面抽运模块, 其结构是由 3 组半导体激光二极管阵列 120° 对称分布, 对激光工作物质进行均匀抽运。半导体激光器中心波长为 808 nm, 工作电流从 20 A 调到 45 A, 工作电压从 26 V 上升到 27.6 V。当工作电流为 45 A 时, 抽运光

功率达 555 W。Nd:YAP 激光晶体的尺寸为 $\phi 4$ mm \times 100 mm, b 向切割, 掺钕质量分数为 0.9%。为抑制 1079 nm 波长光在晶体内的自激振荡, 将 Nd:YAP 晶体的两端面进行抛光并镀对波长 1341.4 nm 和 1079 nm 激光增透膜。半导体激光器和激光晶体的冷却水温控制在 20°C 。

倍频晶体 LBO 的尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 20 mm, 两个端面镀 1341.4 nm 和 670.7 nm 增透膜。和频晶体 KTP 尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 10 mm, 两端面镀 1341.4 nm, 670.7 nm 和 447 nm 增透膜。根据谐振腔的设计, 并且为了提高频率转换效率, 应该把 LBO 和 KTP 靠在一起放在谐振腔最后一臂的激光束腰处, 经计算发现束腰在端镜 M_4 的圆心处。为了把两个晶体温度控制在室温 20°C , 将它们用铜铂片包裹后安装在铜座上, 保持较好的热接触, 晶体的热量传给晶体座, 再通过半导体致冷器 (TEC) 导出至散热片, 最后通过冷水循环系统把热量带走。实验中采用的制冷器控温精度为 0.1°C , 所用的全部晶体均由福晶公司提供。

3.2 腔结构分析

在高功率侧面抽运条件下, 激光晶体的热透镜效应很明显, 因此, 在设计腔型时把激光晶体等效成焦距为 f 的正薄透镜, 在透镜两端分别加一段折射率均匀分布, 长度 $h = L_0/(2n)$ 的光程^[12], L_0 为晶体长度, n 为晶体折射率。因此在考虑热透镜效应的条件下, 图 1 的等效示意图如图 2 所示, 图中, θ 为折叠半角, L_{11} 为 M_1 到 Nd:YAP 晶体左端面的距离, L_{12} 为 Nd:YAP 晶体右端面到 M_2 的距离, L_2 为 M_2 到 M_3 的距离, L_3 为 M_3 到 M_4 的距离。

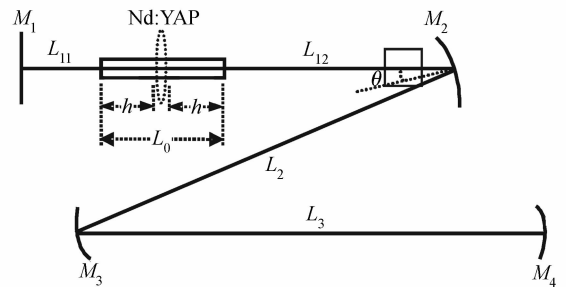


图 2 谐振腔等效示意图

Fig. 2 Corresponding thermal lens equivalent resonator

利用高斯光束变换的 ABCD 定律, 通过 Matlab 软件编程, 结合实际情况反复计算从而最大限度地优化谐振腔参数。图 3 为三种腔长下, 晶体基模半径随热透镜焦距 f 变化的曲线。光斑半径无穷大意味着光束发散, 激光消失, 因此激光腔从稳定区进入

不稳定区, 对应光斑半径从有限到无限大。可以看出, $L_{11} = 130 \text{ mm}$, $L_{12} = 190 \text{ mm}$, $L_2 = 350 \text{ mm}$, $L_3 = 260 \text{ mm}$, $\theta = 11^\circ$, 取这一组谐振腔参数时稳定范围比较大, 大约从 $f = 18 \sim 110 \text{ cm}$, 谐振腔都稳定。

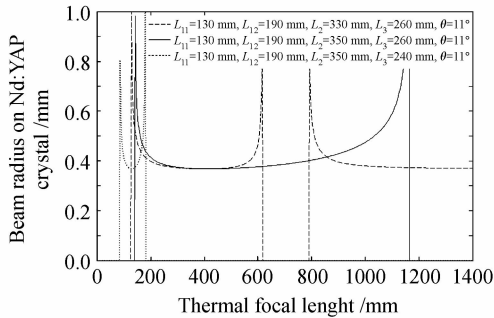


图 3 不同腔长下晶体基模半径随热透镜焦距的变化曲线

Fig. 3 Variation of the beam radius on Nd:YAP crystal with the thermal focal length for different cavity length

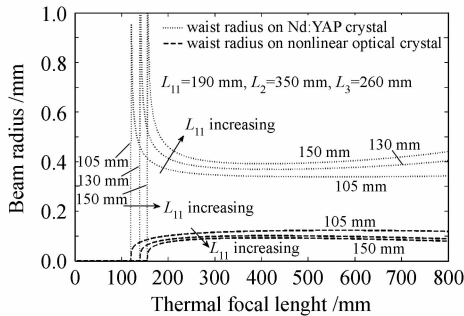


图 4 不同 L_{11} 条件下, 激光晶体和变频晶体处光斑半径随热焦距的变化曲线

Fig. 4 Variation of the beam radius on Nd:YAP crystal and nonlinear crystal with the thermal focal length for different L_{11}

图 4 为不同 L_{11} 条件下, 激光晶体和变频晶体处光斑半径随热透镜焦距 f 的变化曲线。图 4 显示, 在一定范围内随着 L_{11} 的增加, 一方面, 激光晶体上的光斑半径逐渐增大而变频晶体上的光斑半径则减小, 这有利于提高基频光功率, 增加变频转换效率; 而另一方面, 热焦距允许范围在逐渐缩小, 其下限往高移, 这意味着其允许的最高抽运功率在减小, 限制了输入从而压低了最高输出功率。这两个方面对输出功率的贡献是相反的, 而下面的实验结果表明了后者起主导作用。

4 实验结果与分析

为了研究 L_{11} 对输出特性的影响, 实验中分别对 L_{11} 为 105 mm, 130 mm, 150 mm 三种情况进行了对比, 结果如图 5 所示。随着 L_{11} 的增大, 最高输出

功率会减小, 其对应的抽运功率也在降低, 这与理论分析一致。因此为了增加输出功率的最大值, 可以通过缩短 L_{11} 的办法来实现, 但会受 LD 的最大功率限制。实际上 $L_{11} = 105 \text{ mm}$ 时, 输出功率的最大值在 44.5 A 抽运电流下获得, 这接近 LD 的最大工作电流 45 A。

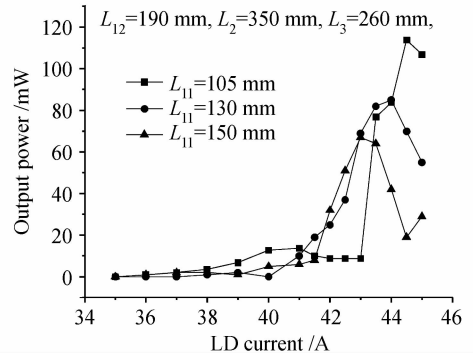


图 5 不同 L_{11} 条件下的输出特性

Fig. 5 Output power for different L_{11}

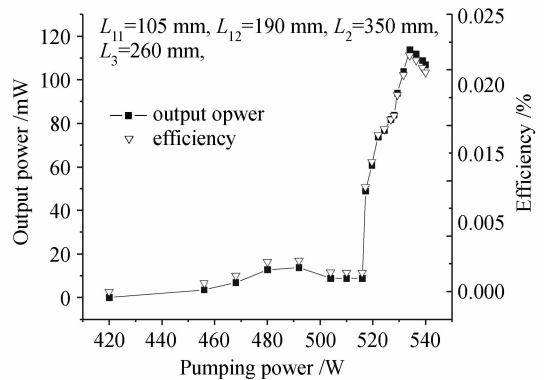


图 6 输出功率和光-光转换效率

Fig. 6 Output power and optical-to-optical efficiency

图 6 为 $L_{11} = 105 \text{ mm}$ 时的输出特性及其光-光转换效率。从图看出抽运功率从 420~534 W, 激光器都处于稳定区, 在抽运功率为 534 W 时获得最大的输出功率 114 mW, 对应的光-光转换效率为 0.02%。其光-光转换效率很低, 这也是很少有关于连续 447 nm 蓝光报道的原因。分析造成转换效率低的主要原因有: 1) 实验中采用的侧面抽运模块, 抽运光并没有经过耦合系统, 而是直接投射到晶体棒上, 因此耦合效率很低。今后应该加强侧面抽运模块抽运技术与耦合技术以及不同加工形状的晶体之间的实验研究, 探讨提高整体光-光转换效率的实验方法。2) 实验中使用的对称抽运模块, 在各方向上对晶体进行均匀抽运, 相当于非偏振光抽运方式。而 Nd:YAP 晶体在 800 nm 附近对于不同的偏振方向的光存在着不同的吸收峰值中心, 在非偏振光抽

运下,虽然具有较宽的吸收带宽,然而平均有效吸收系数仅为最大值的一半,这直接影响了光-光转换效率^[13]。3) 由于采用侧面抽运方式,基频光为多横模,光束质量差,从而导致倍频和三倍频转换效率变得更低。解决此问题的最好办法是使用谐振器通过腔外谐振来产生高功率高光束质量的倍频红光,然后再实现和频产生连续蓝光。然而实现谐振要求单纵模基频光,而且谐振器技术复杂,对环境要求高,价格昂贵,因此不利于实际应用。

5 结 论

以 Nd:YAP 晶体为增益介质,利用 I 类临界相位匹配 LBO 和 II 类临界相位匹配 KTP 分别进行腔内倍频与和频,通过 LD 侧面抽运四镜折叠腔获得最大输出功率为 114 mW 的连续 447 nm 蓝光激光,然而光-光转换效率低,如何提高转换效率成了今后研究的重点。实验结果表明通过 LD 侧面抽运 Nd:YAP 晶体腔内三倍频的方式是获得连续 447 nm 蓝光的有效方法,并可以将该方法推广到其他三倍频激光器中,为全固态激光器的发展提供一个新的方向。

参 考 文 献

- 1 Dong Jingxing, Luo Qihong, Cheng Xusan *et al.*. 488 nm blue laser by direct frequency doubling of laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):567~570
董景星,楼祺洪,成序三等. 半导体激光直接倍频的 488 nm 蓝光激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):567~570
- 2 C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6):

- 432~434
- 3 Y. Chen, H. Peng, W. Hou *et al.*. 3.8 W of cw blue light generated by intracavity frequency doubling of a 946-nm Nd:YAG laser with LBO [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**:241~243
- 4 Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO₄/LiB₃O₅ 457 nm blue laser with 4.6 W of output power [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8):1070~1072
- 5 F. Jia, Q. Xue, Q. Zheng *et al.*. 5.3 W deep-blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd:GdVO₄ [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**:245~247
- 6 Yanfei Lü, Xihe Zhang, Zhihai Yao *et al.*. 6.2-W deep blue light generation by intracavity frequency-doubled Nd:GdVO₄ using BiBO [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):407~408
- 7 Xiaodong Mu, Yujie J. Ding. Efficient third-harmonic generation in partly periodically poled KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9):623~625
- 8 Y. F. Chen, Y. S. Chen, T. H. Ou *et al.*. Compact efficient diode-pumped Nd:YVO₄ Q-switched blue laser with intracavity frequency tripling [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**:517~520
- 9 Haibo Peng, Wei Hou, Yahui Chen *et al.*. Generation of 7.6-W blue laser by frequency tripling of a Nd:YAG laser in LBO crystals [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14):6543~6549
- 10 Zhu Haiyong, Zhang Ge, Huang Chenghui *et al.*. High-power cw diode-side-pumped Nd:YAP laser at 1341.4 nm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(9):1413~1416
朱海永,张戈,黄呈辉等. 高功率连续侧面泵浦 1341.4 nm Nd:YAP 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(9):1413~1416
- 11 Yang Tao, Wang Jianjun, Jiang Dongsheng *et al.*. All-solid-state red laser with 83 W output power at 659.5 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1178~1181
杨涛,王建军,姜东升等. 83 W 659.5 nm 全固态红光激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1178~1181
- 12 Shen Hongyuan. Thermal effects in orthorhombic YAP crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 1981, **30**(8):1085~1100
沈鸿元. 正交晶系 YAP 晶体的热效应[J]. *物理学报*, 1981, **30**(8):1085~1100
- 13 M. Boucher, O. Musset, J. P. Boquillon *et al.*. Multiwatt CW diode end-pumped Nd:YAP laser at 1.08 and 1.34 μm : influence of Nd doping level [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **212**:139~148