

低温冷却高平均功率 Yb:YAG 激光器

吴武明 吴慧云 许晓军 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 工作物质的热效应是半导体抽运固体激光器向更高输出功率发展的瓶颈之一。介绍了能够同时实现高平均功率和高光束质量输出的低温冷却 Yb:YAG 固体激光器。总结了这种激光器阈值低、光学畸变小、效率高、能定标放大等突出优点。详细分析了 Yb:YAG 晶体在低温下的各种热力学和光谱性质,这些优异特性使激光器具有较小的热畸变和高效率的激光输出。最后比较了 3 种不同冷却方法,综述了高平均功率低温冷却 Yb:YAG 激光的最新研究进展。

关键词 固体激光器; Yb:YAG 晶体; 低温冷却; 高平均功率; 热力学和光谱性质; 冷却方法

中图分类号 TN248.1

OCIS 140.3580 140.6810

文献标识码 A

Cryogenically Cooled High Average Power Yb:YAG Laser

Wu Wuming Wu Huiyun Xu Xiaojun Guo Shaofeng

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Thermal effects in solid state laser media have become a bottleneck of the development towards high power for diode-pumped solid state laser. The cryogenically cooled Yb:YAG solid state laser can realize high average power and good beam quality. Its advantages including low laser threshold, high efficiency and scalable output, are summarized. The thermo-optic and spectroscopic properties of Yb:YAG crystal at lower temperatures are analyzed, which makes it possible to provide efficient laser sources with small thermal effect. Finally three different cooling methods are compared and the progress in cryogenically cooled high average power Yb:YAG laser is presented.

Key words solid state laser; Yb:YAG crystal; cryogenically cooled; high average power; thermo-optic and spectroscopic properties; cooling methods

1 引言

Yb:YAG 具有较好的热力学性能和能掺杂高浓度离子等特点,而且在 941 nm 处吸收谱线较宽(达到 18 nm)。而一般高功率激光二极管(LD)输出波长的温度系数典型值为 0.25 nm/°C,所以它对 LD 的温控要求较低,比较容易实现抽运波长与晶体的吸收峰匹配。最重要的是 Yb:YAG 量子数亏损是 Nd:YAG 的 1/3 左右^[1],这大大降低了废热的产生。它是一种非常适合 LD 抽运的高平均功率和高光束质量的发射 1 μm 左右波长的激光材料,万瓦级的薄片 Yb:YAG 激光器已经实现了连续输出^[2]。

Yb:YAG 激光器在室温条件下能够产生高平均功率输出,但是准三能级系统和非线性热畸变限制其功率和光束质量。低温冷却激光介质的方式可以实现输出高平均功率同时保持高的光束质量。Yb:YAG 作为准三能级系统,在室温 300 K 时其基态激光上能级在基态之上的 612 cm⁻¹,激光下能级粒子数是基态的 5%左右^[3]。而在 100 K 时激光下能级几乎没有粒子数,成为真正的四能级系统,此时激光阈值低,容易实现激光输出。在 100 K 左右时,Yb:YAG 在 1030 nm 处的有效发射截面为 1.1×10⁻¹⁹ cm²,为室温下的 5 倍左右;在 941 nm 处的吸收截面是在 300 K 时的 2.1 倍左右,同时吸收带宽只变小约 4 nm(为 13 nm),这避免

收稿日期: 2009-09-01; 收到修改稿日期: 2009-10-19

基金项目: 国防科技预研基金(513260102)资助课题。

作者简介: 吴武明(1981—),男,助理研究员,主要从事固体激光器及自适应光学等方面的研究。

E-mail: treewwm@yahoo.com

了 LD 由于温度影响而波长漂移的问题^[1]。Yb:YAG 的激光上能级荧光寿命在 100 K 左右时依然很长,约为 951 μs ^[3]。Yb:YAG 在低温下折射率温度系数 dn/dT 和热膨胀系数 α 变小很多,而热导率 κ 变大,在 100 K 时, $dn/dT=0.9\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\alpha=1.95\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\kappa=47\text{ W}/(\text{cm}\cdot\text{K})$ 。这些热力学特性的变化大大减小了热效应带来的光学畸变,从而为实现高光束质量提供了保障^[1]。因此低温冷却的 Yb:YAG 激光器特别适合应用在航空间低温环境中,是实现 100 kW 级别高能固体激光器的途径之一。本文重点介绍高平均功率低温冷却 Yb:YAG 激光器的优点、相关技术与研究进展。

2 Yb:YAG 在低温下的特性

2.1 热力学性质

Yb:YAG 激光基质材料热力学特性主要包括热导率 κ , 热膨胀系数 α 和折射率温度系数 dn/dT 。这些系数都随温度变化而改变。Yb:YAG 的 κ 和 α 随温度减小而变大,而 dn/dT 随温度降低而减小^[4]。图 1 给出了未掺杂 YAG 晶体的热导率、热膨胀系数和折射率温度系数随温度变化情况^[1]。可以看出,随着温度下降,YAG 晶体的热导率变大,热膨胀系数和折射率温度系数变小。由于 Yb 离子占 Yb:YAG 的百分比较小,Yb:YAG 的热力学特性随温度变化规律和未掺杂的 YAG 类似。

激光介质由于冷却会造成温度和应力不均匀分布,会使介质折射率发生变化,从而导致光束畸变。激光材料的热效应一般包括热透镜效应和热致双折射。对于热致双折射评价因子 F_D 可定义为: $F_D = \kappa / (\chi_D |\alpha|)$, 式中 χ_D 为晶体的量子数亏损, $\chi_D = 1 - \lambda_P / \lambda_L$ (λ_P 和 λ_L 分别为抽运和激光波长)。量子数亏损和热膨胀系数越大,热导率越小,即热应力影响越大,热致双折射也就更严重, F_D 数值越小。

对于热透镜效应评价因子 F_B 可定义为: $F_B = \kappa / \chi_L |dn/dT|$, 式中 χ_L 为产热率,表示量子亏损所致热占输出激光能量百分比,即 $\chi_L = (1 - \chi_D) / \chi_D$ 。表 1 列出了 3 种不同情况下这两种评价因子的相对数据。从表中数据可以得出,Yb:YAG 的热致双折射评价因子和热透镜效应评价因子在 100 K 时分别是 300 K 的 9 倍和 13.5 倍左右,即热致双折射和热透镜效应影响分别为 1/9 和 1/13.5。

表 1 不同温度下 Yb:YAG 和 Nd:YAG 热-光学性质

Table 1 Thermal-optic properties of Yb:YAG and Nd:YAG at different temperatures

Crystal	Yb:YAG at 100 K	Yb:YAG at 300 K	Nd:YAG at 300 K
	($\lambda_P=0.94\ \mu\text{m}$)	($\lambda_P=0.94\ \mu\text{m}$)	($\lambda_P=0.808\ \mu\text{m}$)
χ_L	0.095	0.095	0.31
χ_D	0.087	0.087	0.24
$\kappa / [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	39(1% atomic fraction doping) 8.7(1% atomic fraction doping)		11
$(dn/dT) / \text{K}^{-1}$	0.9	2.7	7.8
$\alpha / (10^{-6}/\text{K})$	2.0	4.0	6.2
F_B	87	9.6	1
F_D	31	2.3	1

2.2 光谱性质

激光材料的光谱特性通常用吸收带宽、吸收截面、荧光寿命、发射截面等参数衡量。而温度变化后,光谱性质都会发生较大的改变。文献[4]测量了掺杂原子数分数为 9.8%、长度为 24 mm 的 Yb:YAG 分别在 300 K 和 75 K 的吸收光谱。从图 2 可以看出,在 941 nm 处的吸收截面在 75 K 时大约是在 300 K 的 2 倍,带宽从 300 K 时的 18 nm 变为 75 K 时的 13 nm,这避免了由于温度升高导致带宽变得太小而无法用 LD 抽运。但是在低温下 Yb:YAG 的最大吸收峰是 968 nm,其带宽只有 0.1 nm,在实际中无法用 LD 抽运。荧光寿命可以通过测量直接得到^[5,6],文献[7]测量不同掺杂浓度的 Yb:YAG 在低温下的荧光寿命,实验中采取了措施避免了

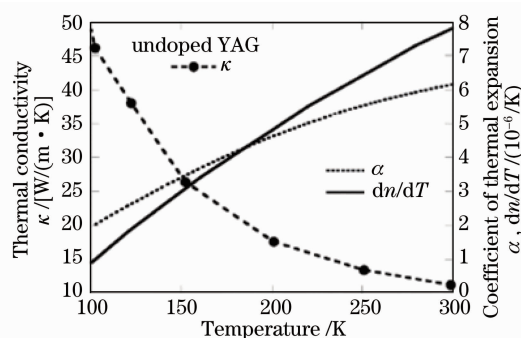


图 1 YAG 的热导率 κ , 热膨胀系数 α 和折射率温度系数 dn/dT

Fig. 1 Thermal conductivity κ , coefficient of thermal expansion α , and dn/dT for undoped YAG

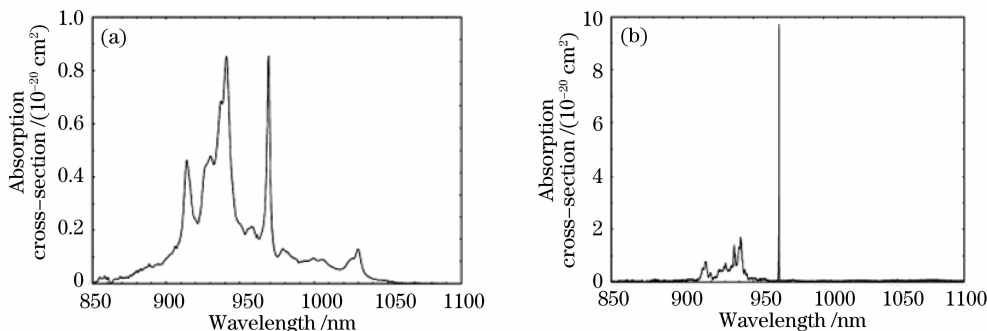


图2 Yb:YAG在300 K (a)和75 K(b)时的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectra for Yb:YAG at 300 K (a) and 75 K (b)

荧光捕获带来的误差,图3给出了测量结果。从图3可以看出,温度对低掺杂Yb:YAG的荧光寿命影响不是太大,保持在1 ms左右,随着温度变低,荧光寿命稍微变小^[7,8]。文献[1]通过新的方法减少了测量误差,测量得到原子数分数为2%的Yb:YAG在80 K时的发射截面 $\sigma_e(1030 \text{ nm})$ 约为 $1.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。

3 低温冷却方法

抽运源向固体激光介质提供产生激光所需能量的同时,虽然LD抽运低温冷却Yb:YAG激光器大大减少了废热的产生,但是在介质中还是会造成无用热。另外为了保证LD输出波长不漂移也需要冷却LD。所以为了持续工作,必须及时从激光介质和LD中消除这些无用热,好的冷却方法对于低温环境下工作的Yb:YAG激光器而言尤为至关重要。

激光器中一般有被动传导冷却、主动传导冷却及直接冷却3种方法^[4]。3种方法都是通过冷却液体LN₂来带走热量。前两种是通过热沉间接来传导冷却Yb:YAG和LD,被动传导冷却中LN₂气体不流动,而主动传导冷却中LN₂气体通过流动带走热量,直接冷却是通过喷射LN₂来冷却。主动传导冷却和直接冷却系统的可扩展性超过了传导低温冷却系统,且有冷却量大的优点。

文献[9]具体分析了100 kW输出的低温冷却Yb:YAG激光器利用直接冷却方法的可行性,并设计了冷却系统的参数及LN₂喷嘴的结构等,得出了通过优化设计冷却系统的参数直接冷却是可以满足要求的。要实现输出100 kW的低温冷却Yb:YAG激光器,它的各部分效率及废热分布如图4所示。假设总的插拔效率为45%,则所需电能功率约为221 kW,抽运激光二极管电光效率为80%,则LD有40 kW的废热需要冷却。Yb:YAG激光器光光转换效率为63%,则晶体有47 kW的废热需要冷却。这些废热需要的LN₂喷嘴个数约为696个,所需LN₂气体的质量约为1392 g/s^[9]。

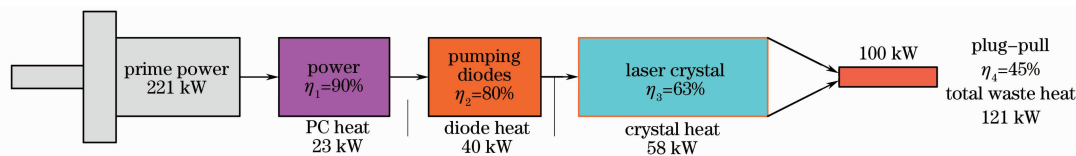


图4 100 kW低温冷却Yb:YAG激光器系统能量流程图

Fig. 4 Flow chart of energy for 100 kW cryogenically cooled Yb:YAG laser

4 最新研究进展

4.1 端面抽运棒状激光器

D. J. Ripin等^[10]对低温冷却Yb:YAG激光器做了大量研究,2004年他们采用激光二极管端面抽运长

度 15 mm, 直径 4 mm, 掺杂原子数分数为 5% 的棒状 Yb:YAG, 两端各键合长度 3 mm 未掺杂 YAG 晶体, 激光器结构如图 5 所示。采用被动传导冷却方法来控制温度在 100 K 左右, 激光器获得了功率为 160 W, $M^2=1.02$ 的输出, 光-光转换效率高达 76%, 斜率效率为 85%。2005 年他们用类似的光路来实现低温冷却 Yb:YAG 激光放大器, 放大器中的棒状 Yb:YAG 参数与 2004 年相同, 种子光为 110 W, $M^2=1.1$ 。单个晶体放大获得了 250 W, $M^2=1.1$ 的输出, 光-光转换效率为 54%。双晶体串接放大获得了 300 W, $M^2=1.1$ 的激光输出, 光-光转换效率为 64%^[11]。

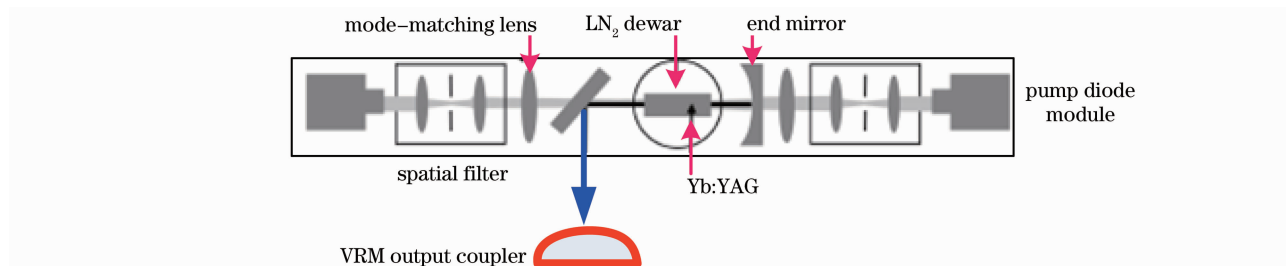


图 5 激光二极管端面抽运低温冷却 Yb:YAG 激光器结构图

Fig. 5 Schematic of diode end-pumped cryogenically cooled Yb:YAG laser

2009 年 Jason K. Brasseur 等^[12] 选用类似的放大器结构, 利用 300 W 的种子光, 通过两组放大器 (4 个晶体) 串接放大后获得了 2.3 kW, 光-光转换效率为 63%, $M^2 \approx 1.2$ 的激光输出, 激光放大器结构如图 6 所示。这是迄今为止低温冷却激光器获得的最大功率, 他们下一步计划通过增大抽运功率来获得更大功率的激光输出, 同时实现对激光二极管抽运源的低温冷却。

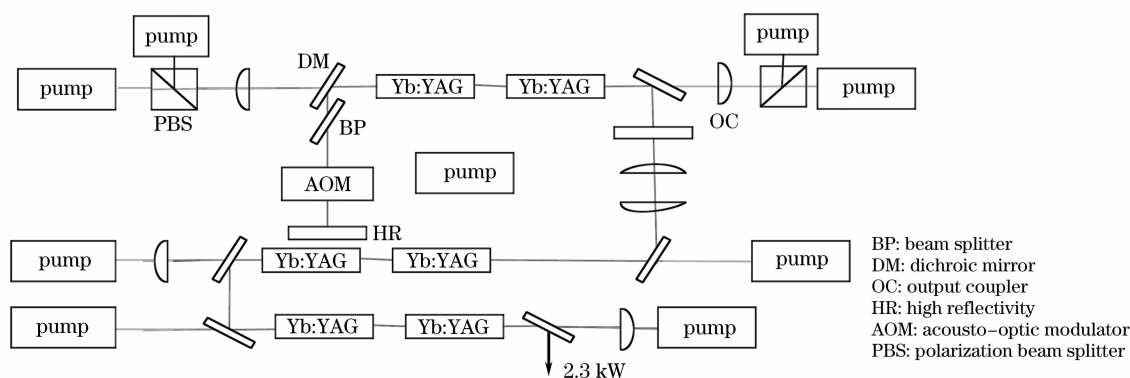


图 6 2.3 kW Yb:YAG 激光放大器结构图

Fig. 6 Schematic of 2.3 kW cryogenic Yb:YAG master oscillator power amplifier

4.2 侧面抽运薄片激光器

通过对常温薄片激光器的进一步研究, 人们发现侧面抽运能提供一条长的吸收路径, 进而可以降低增益介质的厚度以便实现小的热效应, 显示出很大的优势。低温冷却下的侧面抽运薄片 Yb:YAG 结构也是采用同种思路。2005 年 S. Tokita 等^[13] 利用 LN_2 气体端面冷却厚度 0.6 mm, 直径 6 mm, 掺杂原子数分数为 25% 的薄片 Yb:YAG, 两边各包裹厚度 1.6 mm 的蓝宝石晶体, 通过光纤耦合输出来侧面抽运。当抽运功率为 106 W 时获得了功率为 75 W, $M^2 < 1.1$ 的输出, 此时光-光转换效率为 80%、斜率效率为 70%。

2008 年 D. C. Brown 等^[14] 提出了输出功率可以达到千瓦的高光束质量低温冷却下的侧面抽运薄片 Yb:YAG 的设计, 如图 7 所示。采用 7 块圆形薄片 Yb:YAG 玻璃分别与 2 块蓝宝石晶体组成三明治结构, 光纤耦合输出的 940 nm 激光从侧面抽运, 获得了大于 550 W 的单横模输出。由于被动传导冷却系统的可扩展性受限制, 在实验中改用使冷却气体在通道内流动的主动传导冷却方法, 效果明显且为将来大功率激光输出提供扩展性。只要增加晶体数目和抽运光功率, 此种激光器结构可以获得千瓦级的高平均功率输出。

由于陶瓷材料的优异性, Yb:YAG 陶瓷作为高能激光输出的材料也越来越多地得到研究。对于低温冷却下

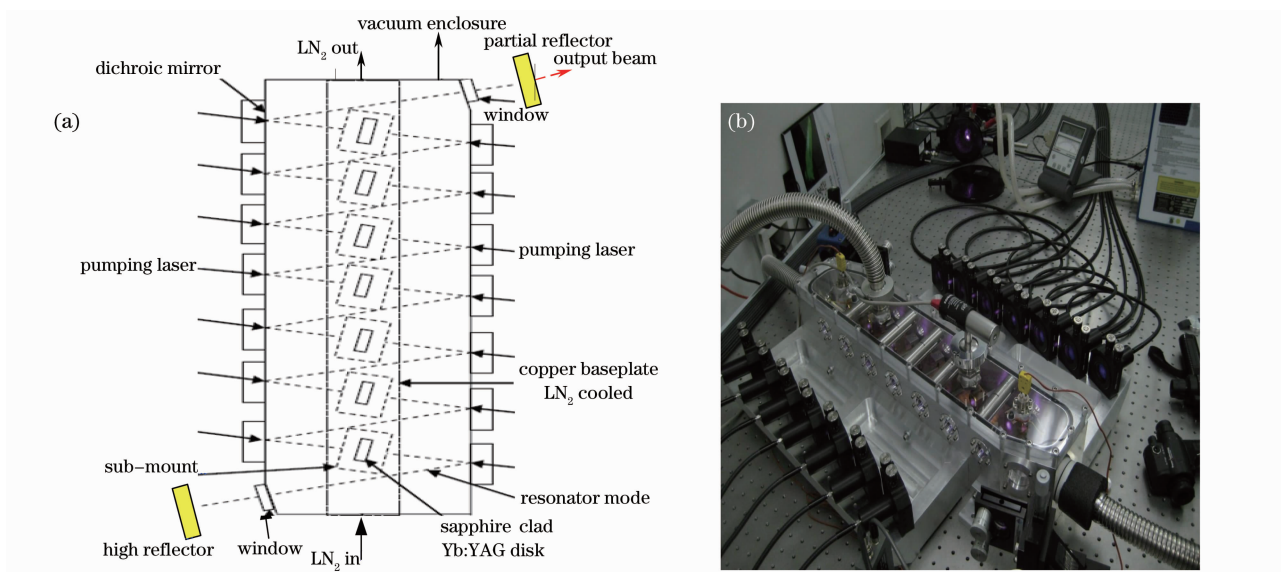


图 7 LD 抽运低温冷却 Yb:YAG 晶体激光器结构(a)及实物图(b)

Fig. 7 Schematic (a) and photograph (b) of LD-pumped Yb:YAG cryogenic laser

Yb:YAG陶瓷激光器,2009年 H. Furuse 等^[15]利用如图 8 所示的激光器结构实现了斜率效率 72%、最大 273 W 的输出,这是高平均功率固体激光器取得的最高斜率效率。他们采用 0.4 mm 掺杂原子数分数为 9.8%的 Yb:YAG,晶体键合在梯形状的未掺杂 YAG 陶瓷上面,通过光纤耦合输出 940 nm 来侧面抽运晶体。他们还利用 He-Ne 激光来测试激光器的热透镜大小,在抽运功率大于 200 W 时才观察到热透镜效应。

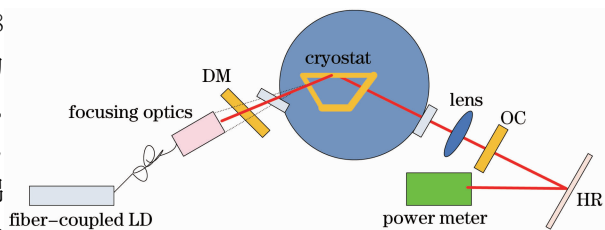


图 8 LD 抽运低温冷却 Yb:YAG 陶瓷激光器结构图
Fig. 8 Schematic of LD-pumped cryogenically cooled Yb:YAG ceramics

5 结 论

降低高功率激光器工作时产生废热手段有很多种,其中用来消除量子缺陷造成无用热的低热抽运技术包括:LD 抽运 Yb 准三能级系统、直接将基态粒子抽运到激光上能级的直接抽运方式、将基态上热激励斯托克斯能级上的粒子直接激发到激光上能级的热助推抽运技术、用激光介质中反斯托克斯荧光去平衡由于斯托克斯频移受激辐射产生热的辐射平衡方式等。

低温冷却 Yb:YAG 激光器是利用 LD 抽运低量子数亏损的 Yb³⁺ 低热抽运技术,结合 Yb:YAG 晶体在低温下的优良的光谱和热力学特性来实现高平均功率和高光束质量输出能力。它具有阈值低、光学畸变低、效率高等突出优点,而且能定标放大,是固体激光器减小热效应、提高光束质量的有效途径,是发展高功率固体激光器的重要发展方向。随着低温冷却技术的发展和成熟,特别是在空间航天的低温环境中,低温冷却 Yb:YAG 激光器的优点必将充分发挥,它将成为工业激光加工、航天科研及军事应用等领域非常重要的激光光源。

参 考 文 献

- 1 Tso Yee Fan, Daniel J. Ripin, L. Roshan *et al.*. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 448~459
- 2 Petras V. Avizonis, David J. Bossert, Mark S. Curtin. Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers[C]. *Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, OSA, 2009. CThA2
- 3 W. Koechner. *Solid-State-Laser Engineering*[M]. 5th ed., New York: Springer, 1999. 84~87
- 4 David C. Brown. The promise of cryogenic solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):

587~599

- 5 D. S. Sumida, T. Y. Fan. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and stimulated emission cross section measurements in solid-state laser media[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17): 1343~1345
- 6 Laura D. DeLoach, Stephen A. Payne, L. L. Chase *et al.*. Evaluation of absorption and emission properties Yb³⁺ doped crystals for laser applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(4): 1179~1191
- 7 Jun Dong, Michael Bass, Yanli Mao *et al.*. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1975~1979
- 8 Yang Peizhi, Deng Peizhen, Yin Zhiwen. Concentration quenching in Yb:YAG crystal[J]. *Chinese J. Luminescence*, 1999, **20**(4): 325~329
杨培志, 邓佩珍, 殷之文. Yb:YAG 晶体中的荧光浓度猝灭现象[J]. *发光学报*, 2000, **20**(4): 325~328
- 9 Dan Rini, Bradley G Carman, Ben Saarloos. Low temperature spray cooling for cryogenic laser systems[C]. The Twenty-First Annual Solid State and Diode Technology Review, Albuquerque, New Mexico, 2008. 470~475
- 10 D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal *et al.*. 165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(18): 2154~2156
- 11 D. J. Ripin, J. R. Ochoa, R. L. Aggarwal *et al.*. 300-W cryogenically cooled Yb:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(10): 1274~1277
- 12 Jason K. Brasseur, Akhelesh K. Abeeluck, Andrew R. Awtry *et al.*. 2.3 kW cryogenically cooled Yb:YAG laser[C]. Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA, 2009. CThR1
- 13 S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita *et al.*. Sapphire-conductive end-cooling of high power cryogenic Yb:YAG lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(6): 635~638
- 14 D. C. Brown, J. M. Singley, E. Yager *et al.*. Kilowatt class high-power CW Yb:YAG cryogenic laser[C]. *SPIE*, 2008, **6952**: 69520K
- 15 H. Furuse, T. Saiki, K. Imasaki *et al.*. Total-reflection active-mirror laser with directly liquid-nitrogen-cooled[C]. Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA, 2009. CThR2