

# 不同参数条件下端面抽运 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光系统的优化

高明 王 澈 王宏元 蒋志刚 张 伟 安国斐 韩聚洪  
蔡 和 薛亮平 周 杰 王顺艳

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

**摘要**  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器是近年来得到广泛关注的新型固体激光光源, 具有吸收和发射截面大、荧光谱线宽、激光阈值低等突出特点。对此三能级激光系统进行微观动力学理论分析, 在探讨了不同的晶体切割方向、抽运光偏振方向和激光偏振方向的吸收和发射特性的基础上研究了  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器输出特性随晶体长度和输出耦合镜反射率的变化规律, 得到了  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器的最佳构成条件, 即: 晶体切割方向平行于  $g$  轴, 抽运光偏振方向平行于  $m$  轴, 激光偏振方向平行于  $p$  轴。

**关键词** 激光器; 输出特性; 各向异性; 端面抽运三能级系统;  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.061409

## Optimization of an End-Pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ Laser with Different Parametrical Conditions

Gao Ming Wang You Wang Hongyuan Jiang Zhigang Zhang Wei An Guofei  
Han Juhong Cai He Xue Liangping Zhou Jie Wang Shunyan

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract**  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser is a new solid-state laser source which has been paid much attention in the recent years. It is characterized with the high absorption and emission cross-section, broad fluorescent linewidth and low laser threshold. The microcosmic kinetic of three energy-level laser system is theoretically analyzed. After investigating the absorptive and emission features with the different crystal cuttings, pump and laser polarization directions, the relationship between the output characteristics of a  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser and the crystal length as well as the reflectance of the output coupler is analyzed. Finally, the optimum conditions for a real  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser have been obtained as: crystal cut-direction parallel to  $g$  axis, pump polarization direction parallel to  $m$  axis and laser polarization direction parallel to  $p$  axis.

**Key words** lasers; output characteristics; anisotropy; end-pumped three energy-level system;  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser

**OCIS codes** 140.3460; 140.3380; 140.3480; 140.3580; 140.6810

## 1 引 言

近年来, 得益于半导体激光器的快速发展以及掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光材料在各个领域的广泛应用<sup>[1-6]</sup>, 掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光晶体越来越受到研究者的关注<sup>[7-10]</sup>。相比于其他激光晶体, 掺  $\text{Yb}^{3+}$  激光晶体具有许多的优良特性; 1)  $\text{Yb}^{3+}$  离子的吸收谱线宽(900~1100 nm)、截面大, 能实现与现有半导体抽运源的有效耦合; 2)  $\text{Yb}^{3+}$  离子的

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-02-01; 网络出版日期: 2016-05-31

作者简介: 高明(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事无热透镜激光器方面的研究。E-mail: gao991987316@sina.com

导师简介: 王 澈(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光技术和光学工程方面的研究。

E-mail: youwang\_2007@aliyun.com(通信联系人)

荧光谱线较宽,可以实现飞秒激光器和可调谐激光器的运转;3)Yb<sup>3+</sup>激光晶体的量子效率高,可以有效降低热效应;4)Yb<sup>3+</sup>激光晶体可以实现高掺杂;5)Yb<sup>3+</sup>离子的能级结构简单,可以有效消除浓度猝灭、粒子上转换和激发态吸收效应<sup>[11-13]</sup>。

Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体最近几年引起了业界的关注,因为它的吸收截面要比常规Yb<sup>3+</sup>:YAG大十多倍,具有构建新型超短脉冲激光和辐射平衡激光器的巨大潜力<sup>[14-17]</sup>。Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体是一种有着C2/c或I2/a空间群结构的掺Yb<sup>3+</sup>激光双轴单斜晶体,具有相互正交的折射率不相同的三个主轴(*m*、*p*、*g*),在光学和热学上有着明显的各向异性,其在不同的光偏振方向上具有不同的吸收和发射截面<sup>[18-21]</sup>。不同的抽运和激光偏振方向将影响Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>激光器的输出功率,因此,选择最优化的晶体切割方向以及抽运光和激光偏振方向对于Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>激光系统的研究是一个重要的课题。本文在前人的研究基础上探究了在不同抽运和激光偏振情况下的Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体激光器的输出特性,并据此得到与晶体的切割方向相关的抽运与激光偏振方向的最优组合。

## 2 理论模型与分析

Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体激光器具有典型的准三能级系统,其基本原理如图1所示。图中,<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub>代表激发态能级,<sup>2</sup>F<sub>7/2</sub>代表基态能级,抽运光从基态子能级*a*到激发态子能级*b*的吸收跃迁为 $h\nu_p = E_b^p - E_a^p$ ,其中*h*为普朗克常量, $\nu_p$ 为抽运光频率,其对应的上下子能级热分数比 $f_b^p$ 和 $f_a^p$ 分别为<sup>[22]</sup>

$$f_a^p = \frac{\exp\left(\frac{-E_a^p}{kT_t}\right)}{\sum_{j=0,\dots,3}^{\text{level}-a} \exp\left(\frac{-E_j^p}{kT_t}\right)}, \quad (1)$$

$$f_b^p = \frac{\exp\left(\frac{-E_b^p}{kT_t}\right)}{\sum_{j=0,1,2}^{\text{level}-b} \exp\left(\frac{-E_j^p}{kT_t}\right)}, \quad (2)$$

式中, $T_t$ 表示温度, $k$ 为波尔兹曼常数。

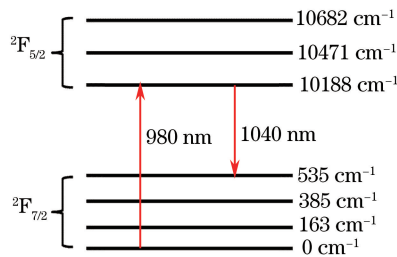


图1 Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体斯塔克能级分布图

Fig. 1 Diagram of Stark energy levels of Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>

同理,受激辐射跃迁为 $h\nu_l = E_b^l - E_a^l$ , $\nu_l$ 为激光频率,其对应的上下子能级热分数比 $f_b^l$ 和 $f_a^l$ 分别为:

$$f_a^l = \frac{\exp\left(\frac{-E_a^l}{kT_t}\right)}{\sum_{j=0,\dots,3}^{\text{level}-a} \exp\left(\frac{-E_j^l}{kT_t}\right)}, \quad (3)$$

$$f_b^l = \frac{\exp\left(\frac{-E_b^l}{kT_t}\right)}{\sum_{j=0,1,2}^{\text{level}-b} \exp\left(\frac{-E_j^l}{kT_t}\right)}. \quad (4)$$

为了简化分析,采用严格的平面波模型来分析Yb<sup>3+</sup>:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>激光器的吸收和辐射跃迁。激光器的输出功率与抽运功率(高于阈值部分)成线性关系<sup>[22]</sup>

$$P_{\text{out}} = \eta_{\text{slope}} (P_p - P_{\text{th}}), \quad (5)$$

式中,  $P_{\text{out}}$  为输出功率,  $P_p$  为抽运功率,  $P_{\text{th}}$  为阈值功率,  $\eta_{\text{slope}}$  为激光器斜率效率且满足

$$\eta_{\text{slope}} = \eta_{\text{mode}} \eta_{\text{del}} \frac{\nu_l (1 - R_{\text{OC}})}{\nu_p R_{\text{OC}}} \times \frac{[1 - \exp(\sigma_p N_{2p})][1 + R_p \exp(\sigma_p N_{2p})]}{[\exp(\sigma_1 N_{21}) - 1][T^2 \exp(\sigma_1 N_{21}) + 1]}, \quad (6)$$

式中,  $R_{\text{OC}}$  为输出耦合镜反射率,  $R_p$  为晶体输出端抽运光反射率,  $T$  为单程激光腔传输率,  $\sigma_p$  为抽运光吸收截面,  $\sigma_1$  为激光发射截面,  $\eta_{\text{mode}}$  为模式匹配效率,  $\eta_{\text{del}}$  为抽运传输效率,  $N_{2p}$  和  $N_{21}$  为斯塔克能级上关于抽运光和辐射激光的反转粒子数浓度, 其表达式分别为

$$N_{2p} = (f_a^p + f_b^p) N_2 - f_a^p n_0 l_s, \quad (7)$$

$$N_{21} = (f_a^1 + f_b^1) N_2 - f_a^1 n_0 l_s, \quad (8)$$

式中,  $n_0$  为掺杂粒子浓度,  $l_s$  为晶体的长度<sup>[22]</sup>,  $N_2$  为激发态粒子浓度, 其表达式为

$$N_2 = \frac{1}{f_a^1 + f_b^1} (f_a^1 n_0 l_s) + \frac{1}{2\sigma_1} \ln\left(\frac{1}{T^2 R}\right), \quad (9)$$

(5) 式阈值功率  $P_{\text{th}}$  可以表示为<sup>[22]</sup>

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p N_2 A}{\eta_{\text{del}} \tau} \frac{1}{[1 - \exp(\sigma_p N_{2p})][1 + R_p \exp(\sigma_p N_{2p})]}, \quad (10)$$

式中,  $A$  为抽运光束横截面面积,  $\tau$  为粒子数寿命, 通过(5)~(10)式, 对  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器进行理论计算。

### 3 结果与讨论

一般晶体的切割方向均平行于  $p$  轴, 抽运和激光的偏振方向均平行于  $m$  轴。但是对于  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  晶体, 切割方向除了可以平行于  $p$  轴, 还可以平行于  $m$ 、 $g$  轴, 抽运光和激光的偏振方向亦可以平行于其他方向, 接下来就此内容进行详细探讨。

#### 3.1 晶体长度和输出耦合镜反射率不变时的激光输出特性

首先, 研究在晶体长度和输出耦合镜反射率均不变的条件 ( $l_s = 3 \text{ mm}$ ,  $R_{\text{OC}} = 0.95$ ), 抽运光和激光偏振方向的最佳组合。按晶体切割方向分别平行于  $m$  轴、 $p$  轴以及  $g$  轴时的情况展开讨论。

当晶体切割方向平行于  $m$  轴时, 抽运和激光偏振方向存在着以下 4 种组合:  $p$ - $p$ 、 $p$ - $g$ 、 $g$ - $p$ 、 $g$ - $g$ ,  $p$ - $p$  表示抽运光和激光的偏振方向都平行于  $p$  轴, 其他以此类推; 当晶体切割方向平行于  $p$  轴时, 抽运和激光偏振方向存在着以下 4 种组合:  $m$ - $m$ 、 $m$ - $g$ 、 $g$ - $m$ 、 $g$ - $g$ ; 同理, 当晶体切割方向平行于  $g$  轴时, 抽运和激光偏振

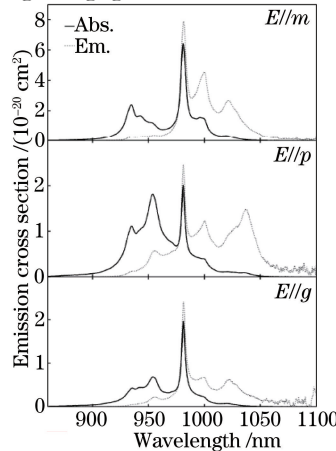


图 2  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  晶体中的折射率主轴 ( $m$ 、 $p$ 、 $g$ ) 偏振方向的吸收和发射截面图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Absorption and emission cross sections of  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  along polarization directions parallel to principal refractive-index axes ( $m$ 、 $p$ 、 $g$ )<sup>[19]</sup>

方向存在着以下4种组合： $m-m$ 、 $m-p$ 、 $p-m$ 、 $p-p$ 。然后，基于上一节中的(5)~(10)式以及图2、表1中列举的数据分别计算各种情况下的激光输出功率，结果如图3所示，图中 $p-m-m$ 表示沿 $p$ 轴切割，抽运光偏振方向平行于 $m$ 轴，激光偏振方向平行于 $m$ 轴，其他以此类推。

表1  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器的相关参数Table 1 Corresponding parameters of  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser

	Parameters		Ref.
Pump wavelength	$\lambda_p$	980 nm	[19]
Laser wavelength	$\lambda_l$	1040 nm	[19]
Length	$l_s$	3 mm	
Doping density	$n_0$	$3.093 \times 10^{26}$	
Mode fill efficiency	$\eta_{\text{mode}}$	90%	
Pump delivery efficiency	$\eta_{\text{del}}$	85%	
Exited stage storage lifetime	$\tau$	275 $\mu\text{s}$	[13]
Cross-sectional area	$A$	0.03 $\text{mm}^2$	[14]
Output coupler reflectivity	$R_{\text{OC}}$	0.95	[14]
Pump power	$P_p$	23.4 W	[14]
Temperature	$T_i$	300 K	
Pump reflectivity	$R_p$	0.98	
One-way cavity transmission	$T$	97.5%	

图3所示为不同切割方向、不同抽运光和激光偏振状态的激光输出功率。从图中可以看到，当抽运光和激光皆为 $m$ 偏振时激光输出功率最大；当抽运光为 $m$ 偏振、激光为 $p$ 偏振时次之；当激光为 $g$ 偏振时激光输出最小，几乎为零。因此，仅就此种情况分析而言，具有较大输出功率 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器的晶体切割方向、抽运光和激光偏振方向的组合为： $p-m-m$ 、 $g-m-m$ 、 $g-m-p$ 。

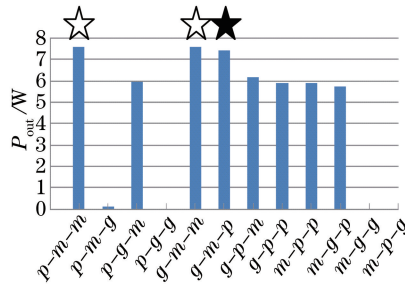


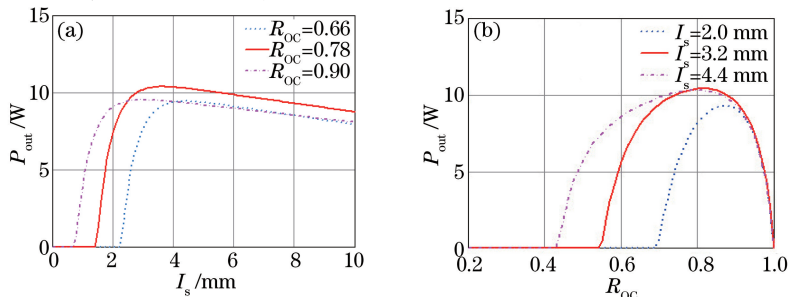
图3 不同切割方向、偏振状态下的功率输出

Fig. 3 Output power for different cut directions and polarized orientations

### 3.2 晶体长度或输出耦合镜反射率变化时的激光输出特性

$\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器的输出功率深受晶体长度和输出耦合镜反射率的影响。当晶体切割方向平行于 $g$ 轴，抽运光为 $m$ 偏振、激光为 $p$ 偏振时激光器输出功率随晶体长度和输出耦合镜反射率的变化曲线如图4所示。

由图4可以看出激光器分别存在着最佳晶体长度和输出耦合镜反射率。因此，为了得到最大的激光输

图4 输出功率随(a)晶体长度 $l_s$ 和(b)输出耦合镜反射率 $R_{\text{OC}}$ 的变化曲线Fig. 4 Changes of output power with (a) crystal length  $l_s$  and (b) output coupler reflectivity  $R_{\text{OC}}$

出,需要同时考虑晶体长度和输出耦合镜反射率对激光输出功率的影响。在同样物理条件下,激光器的输出功率随晶体长度和输出耦合镜反射率的变化曲线如图5所示。由图可知,激光晶体的最佳长度和最佳输出耦合镜反射率分别为3.6 mm和0.8,其相应的最佳功率输出为10.44 W,光-光转换效率为44.6%。同理,可得到其他组合时的最佳晶体长度、输出耦合镜反射率以及相应的激光输出功率。结果如表2所示。

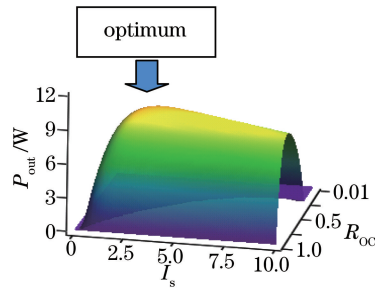


图5 输出功率随晶体长度  $l_s$  和输出耦合镜反射率  $R_{oc}$  的变化曲线

Fig. 5 Changes of output power with the both crystal length  $l_s$  and output coupler reflectivity  $R_{oc}$

表2 各种组合时的激光晶体的最佳长度、输出耦合镜的最佳反射率及其相应的输出功率

Table 2 Optimal lengths optimal reflectivity of output coupler and corresponding output powers of all kinds of combinations

	$P_{out}/W$	$R_{oc}$	$l_s/cm$	$\eta_{opt-opt}$	
$p-m-m$	11.11	0.78	0.32	47.5%	☆
$p-m-g$	4.51	0.94	0.52	19.3%	
$p-g-m$	9.88	0.78	0.66	42.2%	
$p-g-g$	3.70	0.94	0.86	15.8%	
$g-m-m$	11.11	0.78	0.32	47.5%	☆
$g-m-p$	10.44	0.80	0.36	44.6%	★
$g-p-m$	9.99	0.78	0.62	42.7%	
$g-p-p$	9.36	0.82	0.64	40.0%	
$m-g-g$	3.70	0.94	0.86	15.8%	
$m-g-p$	9.25	0.82	0.66	39.5%	
$m-p-g$	3.77	0.94	0.82	16.1%	
$m-p-p$	9.36	0.82	0.64	40.0%	

图6为不同晶体切割方向和不同偏振状态下的最佳长度、输出耦合镜的最佳反射率及与其对应的激光输出功率。从图中可以看出,当晶体切割方向平行于  $p$  轴或  $g$  轴、抽运光  $m$  偏振、激光  $m$  偏振时,光-光转换效率最高,输出功率最大;激光  $p$  偏振时次之;当激光为  $g$  偏振时输出功率最小;在其他情况中又以抽运光为  $m$  偏振时,输出功率最大。虽然抽运光为  $m$  偏振、激光  $m$  偏振时激光器的输出功率最大、光-光转换效率最高,但由于  $Yb^{3+}:KGd(WO_4)_2$  激光器的抽运光与激光的波长较为接近,在构建实用化的激光器时,用

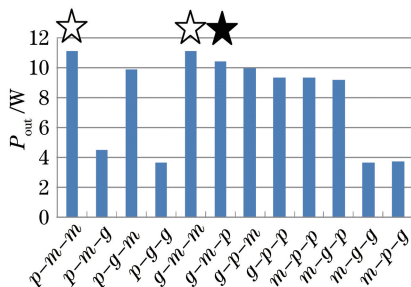


图6 最佳条件下的激光输出功率对比

Fig. 6 Comparison of laser output powers with optimal conditions

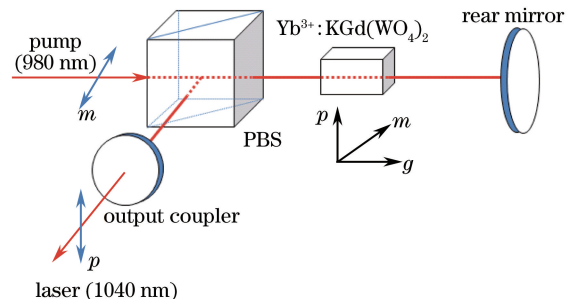


图7 波长相近的抽运光与激光分离的L型激光器构成图

Fig. 7 Laser schematic illustration of L-type laser for separation of pump and laser beams with similar wavelengths

常规镀膜的方式虽能够制作出 980 nm 全反和 1040 nm 半反的全反射腔镜,然而基于目前的工艺技术水准却较难制作出合格的 980 nm 半反和 1040 nm 反射率约为 80% 的输出腔镜。因此,把抽运光与激光偏振方向相互正交的组合(即抽运光平行于  $m$  轴偏振、激光平行于  $p$  轴偏振)作为激光器的首选。图 7 即为这种基于光束偏振分离技术的 L 型激光器的基本构成。综上所述,优化后  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器的物理构成应该为:晶体切割方向平行于  $g$  轴,同时抽运光偏振方向平行于  $m$  轴、激光偏振方向平行于  $p$  轴。

## 4 结 论

对  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器在不同切割方向、不同抽运光和激光偏振情况下的激光输出特性进行了系统的理论研究。在综合考虑实现高输出功率和激光与抽运光分离的前提下, $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器的最佳晶体切割方向为平行于  $g$  轴,抽运光偏振方向平行于  $m$  轴,激光的偏振方向平行于  $p$  轴。为将来构建高功率  $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  激光器提供了重要的理论依据和设计思路。

## 参 考 文 献

- 1 Pavel A Loiko, Valery V Filippov, Konstantin V Yumashev, *et al.*. Thermo-optic coefficients study in  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  and  $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  by a modified minimum deviation method[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(15): 2951-2957.
- 2 P A Loiko, K V Yumashev, N V Kuleshov, *et al.*. Thermal lensing study and athermal directions in flashlamp-pumped  $\text{Nd}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  laser crystal[J]. *Appl Phys B*, 2012, 106: 881-886.
- 3 P A Loiko, K V Yumashev, N V Kuleshov, *et al.*. Thermo-optic dispersion formulas for monoclinic double tungstates  $\text{KRe}(\text{WO}_4)_2$  where  $\text{Re} = \text{Gd}, \text{Y}, \text{Lu}, \text{Yb}$ [J]. *Optical Materials*, 2011, 33(11): 1688-1694.
- 4 P A Loiko, K V Yumashev, N V Kuleshov, *et al.*. Detailed characterization of thermal expansion tensor in monoclinic  $\text{KRe}(\text{WO}_4)_2$  (where  $\text{Re}=\text{Gd}, \text{Y}, \text{Lu}, \text{Yb}$ ) [J]. *Optical Materials*, 2011, 34(1): 23-26.
- 5 D Stucinskis, R Antipenkov, A Varanavicius. Thermal lensing in high-power diode-pumped  $\text{Yb}:\text{KGW}$  laser [J]. *Lithuanian Journal of Physics*, 2010, 50(2): 191-199.
- 6 Sébastien Chénais, François Balembois, Frédéric Druon, *et al.*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-part I: Theoretical analysis and wavefront measurements[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(9): 1217-1234.
- 7 G Paunescu, J Hein, R Sauerbrey. 100-fs diode-pumped  $\text{Yb}:\text{KGW}$  mode-locked laser[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(5): 555-558.
- 8 Julius Vengelis, Ignas Stasevičius, Karolina Stankevičiūtė, *et al.*. Characteristics of optical parametric oscillators synchronously pumped by second harmonic of femtosecond  $\text{Yb}:\text{KGW}$  laser[J]. *Optics Communications*, 2014, 338: 277-287.
- 9 Major Arkady, Barzda Virginijus, Paul A E Piunno, *et al.*. An extended cavity diode-pumped femtosecond  $\text{Yb}:\text{KGW}$  laser for applications in optical DNA sensor technology based on fluorescence lifetime measurements[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5285-5294.
- 10 J E Hellström, S Bjurshagen, V Pasiskevicius, *et al.*. Efficient  $\text{Yb}:\text{KGW}$  lasers end-pumped by high-power diode bars [J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(2): 235-239.
- 11 Steven R Bowman. Lasers without internal heat generation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(1): 115-122.
- 12 Niu Ronglian, Liu Chengcheng, Liu Ying, *et al.*. Thermal lensing effect of diode-pumped  $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  based on convective heat-transfer on the side surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 78-82.  
牛荣莲, 刘成成, 刘莹, 等. 基于侧面热对流的 LD 泵浦  $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  热透镜效应研究 [J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 78-82.
- 13 Subrat Biswal, Shawn P O' Connor, Steven R Bowman. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(15): 3093-3097.
- 14 P Selina, F Christian, S M Christoph, *et al.*. Diode-pumped gigahertz femtosecond  $\text{Yb}:\text{KGW}$  laser with a peak power of 3.9 kW[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16320-16326.
- 15 F Hoos, T P Meyrath, S Li, *et al.*. Femtosecond 5-W  $\text{Yb}:\text{KGW}$  slab laser oscillator pumped by a single broad-area diode and its application as supercontinuum source[J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(1): 5-10.
- 16 Steven R Bowman, Neil W Jenkins, Shawn P O' Connor, *et al.*. Sensitivity and stability of a radiation-balanced laser system[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(10): 1339-1348.



- 17 Steven R Bowman, Shawn P O'Connor, Subrat Biswal, *et al.*. Minimizing heat generation in solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(7): 1076-1085.
- 18 Zhou Mu, Wang Xiaofeng, Tan Jichun. Calculation and analysis of athermal directions of Yb:KGW laser crystal[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 81-85.  
周 沐, 王晓峰, 谭吉春. Yb:KGW 激光晶体无热方向的计算与分析[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 81-85.
- 19 Zhou Mu. Radiation balanced laser's theory and Yb:KGW fluorescence cooling laser's design[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009, 42-48.  
周 沐. 辐射平衡激光器理论及荧光制冷型 Yb:KGW 激光器设计[D]. 长沙:国防科技大学, 2009, 42-48.
- 20 V V Filippov. Athermal directions in KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals under uniform heating[J]. Appl Opt, 2013, 52(18): 4377-4384.
- 21 P A Loiko, V E Kisel, N V Kondratuk, *et al.*. 14 W high-efficiency diode-pumped cw Yb:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser with low thermo-optic aberrations[J]. Optical Materials, 2013, 35(3): 582-585.
- 22 Raymond J Beach. CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators[J]. Optics Communications, 1996, 123(1-3): 385-393.