

30 W 输出的 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光系统的理论设计

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

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 晶体具有增益带宽大、掺杂浓度高等突出特点, 是近年来引起广泛关注的可用于构建锁模飞秒和辐射平衡激光系统的激光介质。这里建立了基于准三能级系统的微观动力学理论模型, 并将其应用于端面泵浦 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 种子源和激光放大系统的理论分析中。首先从速率方程出发, 讨论了准三能级激光系统的种子源部分的物理特性, 指出种子源部分存在着最佳的晶体长度和输出耦合镜反射率。由于 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 晶体材料的热传导率很低, 研究中拟采用主控振荡功率放大结构以实现 30 W 量级的激光输出, 并在此基础上探讨了主控振荡功率放大器部分的输出物理特性。研究结果对将来构建实用化的 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光系统有着重要的理论指导意义。

关键词: 半导体激光泵浦固体激光器; MOPA 结构; $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器; 准三能级; 功率放大

中图分类号: TN248.1; TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1105003

Theoretical design of a $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser system with 30 W output power

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

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal has been paid much attention in the recent years because of its broad gain bandwidth and high dopant concentration and it is considered as an ideal laser medium for constructing a mode-locked femtosecond or a radiation-balanced laser system. A quasi-three-level kinetic model has been built to carry out the theoretical analyses for both the seed part and the amplification part in a $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser system with end-pumped configurations. The research first investigated the physical characteristics of the seed part based on analyses of the rate equations and found that the optimal crystal length and optimal output coupler reflectivity should exist in a lasing oscillator. Because the thermal conductivity of a $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal was relatively low, the research employed a master oscillator power-amplifier (MOPA) to realize the 30 W-output power. Finally, the output physical features of the MOPA part was analyzed. The research results are thought to be useful for construction of a practical $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser system.

Key words: diode pumped solid-state laser; MOPA configuration; $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser; quasi-three level; power amplification

收稿日期: 2016-03-21; 修订日期: 2016-04-23

作者简介: 高明(1990-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事无热透镜激光器方面的研究。Email: gao991987316@sina.com

通讯作者: 王汝(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光技术和光学工程方面的研究。Email: youwang_2007@aliyun.com

0 引言

近年来, 得益于大功率半导体激光器的迅速发展, 半导体激光泵浦固体激光器 (Diode Pumped Solid-State Laser, DPSSL) 成为世界上发展较快、应用较广的激光器之一^[1-2]。该类型的激光器采用输出波长固定的半导体激光器替代传统的氪灯或氙灯作为激光器的泵浦源, 使得固体激光器这种最古老的激光光源获得了崭新的生命力, 在工业加工、远距离通讯、精密探测、临床医学、微电子制造和国防工业等领域得到越来越广泛的应用^[3-4]。主控振荡功率放大器 (Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA) 是将具有高光束质量的种子信号光注入到放大介质中, 采用某种泵浦方式后使种子光得到放大并最终实现高功率输出的一种激光装置。它结合了低功率种子源光束质量较好和放大器功率放大倍率较高的优点, 是构建大功率激光系统时经常采用的成熟技术^[5-6]。

在固体激光器中, 激光增益介质大多数采用稀土离子掺杂, 其中, 又以 Nd³⁺ 掺杂应用最为广泛, 基于此种掺杂离子而建立的四能级模型也早已成熟。而 Yb³⁺ 作为一种较新的掺杂离子, 不仅具有许多类似于 Nd³⁺ 的优点, 还具有吸收带宽、上能级寿命长、量子效率高、热负荷小、不存在激发态吸收和上转换以及基本没有浓度猝灭等独特优势, 因而受到广泛的关注^[7-8]。在掺 Yb³⁺ 激光材料中, 由于只有 ²F_{7/2} 和 ²F_{5/2} 两个能级, 材料的能级结构接近于准三能级系统, 但相较于掺杂 Nd³⁺、Tm³⁺ 等稀土离子介质的准三能级系统又有很大的不同, 因而建立掺杂 Yb³⁺ 离子的激光介质的准三能级激光模型对研究相关激光器的特性十分重要。

与 Yb:YAG 晶体相比, Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体具有更高的吸收截面 (1.2×10⁻¹⁹ cm², 约为 Yb:YAG 晶体的 15.8 倍)、更低的量子亏损 (6.1%, 约为 Yb:YAG 晶体的 63.9%) 和更宽的发射带宽 (20 nm), 因此, 这种晶体是一种性能优异的激光介质。另外, Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体还被应用于飞秒级超短脉冲激光和辐射平衡激光系统的构建之中^[9-10]。但是, 几十瓦量级连续输出的 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光器迄今较为罕见。文中从速率方程出发, 建立了端面泵浦 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 连续激光器的准三能级微观动力学模型, 分析和讨

论了在不同条件下激光谐振腔的输出物理特性。由于 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体材料的热传导率较低, 在构建大功率激光系统时如采用单体 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光系统会使激光晶体内部的温度分布极度不均匀, 容易导致晶体的热损伤。为避免此种激光不易实现较大输出功率的缺陷, 该研究采用了 MOPA 放大结构来实现高功率 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光系统。文中还分析了具有一级放大结构的 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光的 MOPA 输出功率随晶体长度的变化特性, 在理论上验证了此类型激光器实现 30 W 输出的可行性。

1 种子源部分的理论分析与结果讨论

1.1 种子源部分理论模型

Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体是一种有着 C2/c 或 I2/a 空间群结构的双轴单斜晶体^[11-12], 它具有 ²F_{7/2} 和 ²F_{5/2} 两个能级, 其能级图如图 1 所示。

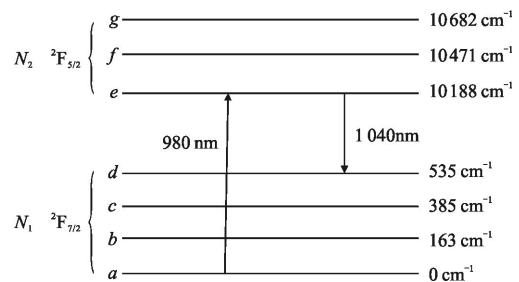


图 1 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光器的能级分布图

Fig.1 Energy-level diagram of a Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ laser

由图中可以看到, 这是一个准三能级系统, 和受激吸收相关的能级为 a、e 能级, 和受激发射相关的能级为 d、e 能级, 泵浦波长为 980 nm, 激光波长为 1 040 nm。此激光系统的稳态速率方程为:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 = \Gamma_p - \Gamma_l - \frac{N_2}{\tau} N_1 + N_2 = N_0, \quad (1)$$

$$\exp[2(f'_b N_2 - f'_a N_1) \sigma_l l] T^2 R_{RM} R_{OC} = 1$$

式中: N₁、N₂ 分别为 ²F_{7/2}、²F_{5/2} 能级的粒子数密度; N₀ 为晶体掺杂浓度; τ 为上能级寿命; T 为单程传输系数; R_{OC} 为谐振腔输出耦合镜反射率; R_{RM} 为谐振腔高反镜反射率; Γ_p 和 Γ_l 分别为泵浦吸收和激光发射速率, 其表达式分别为^[13]:

$$\Gamma_p = \frac{\eta_{mode} \eta_{del} P_p}{h\nu_p V_l} \{1 - \exp[(f'_b N_2 - f'_a N_1) \sigma_p l]\} \quad (2)$$

$$\Gamma_l = \frac{\eta P_{sca} R_{OC}}{h\nu_l V_l (1 - R_{OC})} \{ \exp[(f'_b N_2 - f'_a N_1) \sigma_l l] - 1 \} \times$$

$$\{1+T^2\exp[(f_b^l N_2-f_a^l N_1)\sigma_l l]\} \quad (3)$$

式中： h 为普朗克常数； V_l 为激光模式体积； η_{mode} 为模式匹配效率； η_{del} 为泵浦传输效率； P_p 和 P_{seed} 分别为泵浦功率和种子光输出功率； l 为晶体长度； ν_p 和 ν_l 分别为泵浦光和激光频率； σ_p 和 σ_l 分别为泵浦光吸收和激光发射截面； f_a^p 和 f_b^p 分别为低能级和高能级上与泵浦相关的超精细结构粒子数分布比率 (Fractional Population in the Level)，其表达式为^[13]：

$$f_a^p = \frac{\exp\left(\frac{-E_a^p}{kT_l}\right)}{\sum_{j=0 \dots 3}^{\text{level}-a} \exp\left(\frac{-E_a^j}{kT_l}\right)} \quad (4)$$

$$f_b^p = \frac{\exp\left(\frac{-E_b^p}{kT_l}\right)}{\sum_{j=0 \dots 3}^{\text{level}-b} \exp\left(\frac{-E_b^j}{kT_l}\right)} \quad (5)$$

式中： f_a^l 、 f_b^l 分别为低能级和高能级上与激光相关的超精细结构粒子数分布比率。其计算表达式为：

$$f_a^l = \frac{\exp\left(\frac{-E_a^l}{kT_l}\right)}{\sum_{j=0 \dots 3}^{\text{level}-a} \exp\left(\frac{-E_a^j}{kT_l}\right)} \quad (6)$$

$$f_b^l = \frac{\exp\left(\frac{-E_b^l}{kT_l}\right)}{\sum_{j=0 \dots 3}^{\text{level}-b} \exp\left(\frac{-E_b^j}{kT_l}\right)} \quad (7)$$

根据公式(1)~(7)，就可建立基于准三能级系统的 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器的微观动力学模型，并据此对激光系统的种子源部分进行理论分析，同时为后续的激光放大器部分提供入射参量。

1.2 种子源部分结果讨论

文中选用掺杂浓度为 5 at.% 的 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 晶体作为激光增益介质，图 2 所示为激光器谐振

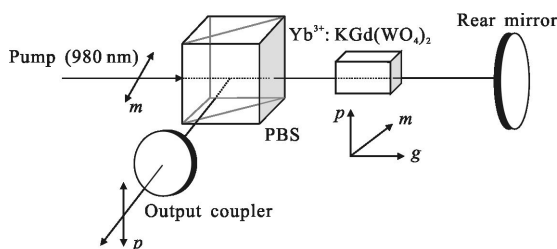


图 2 谐振腔部分原理图

Fig.2 Schematic illustration of the laser oscillator

腔部分的设计结构。该方案中，泵浦光平行于 m 轴偏振，激光平行于 p 轴偏振，并由偏振分光棱镜实现泵浦和激光的分离。由公式(1)~(7)可以看出谐振腔的输出功率与泵浦光功率、晶体长度和输出耦合镜的反射率有关，接下来将就此展开详细讨论。

图 3 所示为晶体长度分别为 2、5 和 10 mm 时谐振腔输出功率随泵浦光功率的变化曲线。由图中可以看出，在泵浦光小于 100 W 的范围内，谐振腔输出功率与泵浦光呈线性关系；晶体长度为 5 mm 的谐振腔输出功率高于晶体长度为 2 mm 和 10 mm 时的谐振腔输出功率，这说明对于谐振腔输出功率来说，晶体长度应该存在着最佳值。因此，为了提高谐振腔的输出功率，需要研究输出功率与晶体长度的关系以确定最优化的晶体长度。

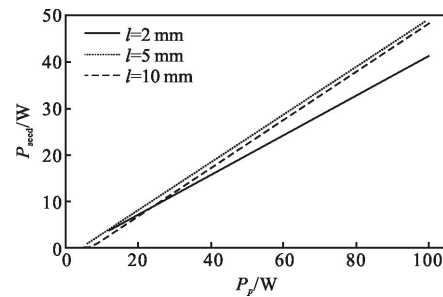


图 3 种子激光输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig.3 Relationship between the output power of a seed laser and the pump power

选择种子光部分泵浦功率为 30 W。如图 4 所示，当输出耦合镜反射率为 65% 时，对应着最大激光输出功率的晶体最佳长度约为 6 mm；当输出耦合镜反射率为 80% 时，晶体的最佳长度约为 5 mm；当输出耦合镜反射率为 95% 时，晶体的最佳长度约为 4 mm。

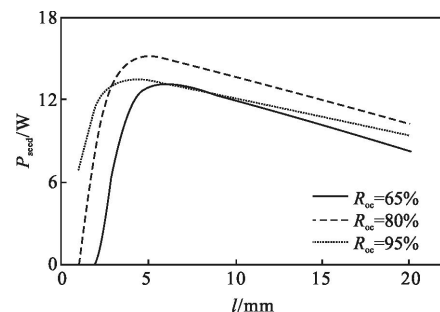


图 4 种子激光输出功率随晶体长度的变化关系

Fig.4 Relationship between the output power of a seed laser and the crystal length

图 5 所示为输出耦合镜反射率分别为 65%、80% 和 95% 时种子激光输出功率随泵浦光功率的变化曲线。由图中可以看出,输出耦合镜反射率为 65% 和 95% 时种子光的输出功率均小于输出耦合镜反射率为 80% 时的种子光输出功率,这就说明对于种子光输出来说,激光谐振腔存在着一个最佳化的输出耦合镜反射率。

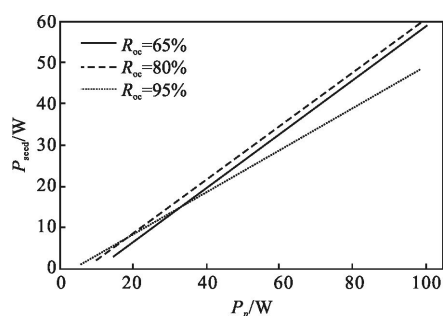


图 5 种子激光输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig.5 Relationship between the output power of a seed laser and the pump power

图 6 所示即为晶体长度分别为 2、5 和 10 mm 时种子光输出功率随输出耦合镜反射率的变化曲线。从图中可以看出,种子光输出功率随输出耦合镜反射率呈先增大后减小的趋势;当晶体长度为 2 mm 时,存在着最佳的输出耦合镜反射率约为 92%;当晶体长度为 5 mm 时,存在着最佳的输出耦合镜反射率约为 86%;当晶体长度为 10 mm 时,最佳的输出耦合镜反射率约为 86%。

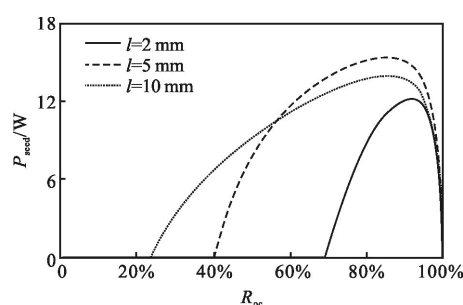


图 6 种子激光输出功率随输出耦合镜反射率的变化关系

Fig.6 Relationship between the output power of a seed laser and the output coupler reflectivity

对于准三能级系统,吸收的泵浦光能量除了以种子光的形式发射出来,还会以晶体内的发热量、荧光功率以及激光腔内损耗等形式损失,其中又以晶体内部产生的热能为最大。在晶体长度分别为 2、5 和

10 mm 的条件下产热量随泵浦源的变化关系如图 7 所示。由图中可以看出,在这种情况下,晶体内部产生的热能随泵浦功率呈线性变化关系,并且,随着晶体长度的增加所产生的热能也逐渐增加,但是在长度大于 5 mm 后,产生的热量趋于饱和。

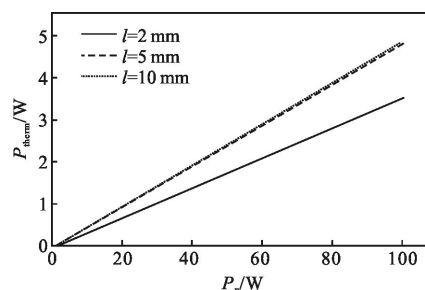


图 7 热量随泵浦功率的变化关系

Fig.7 Relationship between the thermal power and the pump power

综上所述,为了能够得到最大化的种子光输出,不仅需要同时顾及晶体长度和输出耦合镜反射率,还需考虑晶体内部产生的热能。最后,选择种子激光中 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体的长度为 5 mm,输出耦合镜的反射率为 86%。从以上的分析可以看出,即便是各种物理参量均实现了最优化,种子光部分的最大输出功率也仅仅约为 15 W 左右,很难实现激光器的大功率化,因此,需要考虑采用 MOPA 结构进行功率放大。

2 放大级部分理论分析与结果讨论

2.1 放大级部分理论分析

表 1 中列出了八种激光晶体的热传导率。可以看到,八种材料中 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 晶体的热传导率最低。因此,在实际运用中很难直接使用单体 Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ 激光器实现大功率化。

表 1 不同种类晶体的热传导率

Tab.1 Thermal conductivity of different kinds of crystals

Crystal	Thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·K
Yb:KGW	2.5(N _p); 3.0(N _m); 3.5(N _g)
Nd:YLF	6.3
Nd:YVO ₄	// C:5.23; ⊥ C:5.10
Er:YAG	12
Nd:YAG	14(20 °C); 10.5(100 °C)
Be ₃ Al ₂ Si ₆ O ₁₈	23
Tm:YAG	13.1(20 °C)
Yb:YAG	14(25 °C)

文中采用 MOPA 结构来实现对 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光输出功率的放大。对于 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 这样的准三能级晶体来说, MOPA 放大级的稳态速率方程可由下面公式表示^[14-15]:

$$N_1 + N_2 = N_0 \quad (8)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \Gamma_p - \Gamma_l - \frac{N_2}{\tau} = 0 \quad (9)$$

式中: Γ_p 、 Γ_l 分别为 ${}^2\text{F}_{7/2}$ 、 ${}^2\text{F}_{5/2}$ 能级的粒子数密度; N_0 为晶体掺杂浓度; τ 为上能级寿命; Γ_p 和 Γ_l 分别为泵浦吸收和激光发射速率, 其表达式为:

$$\Gamma_p = \frac{\eta_{\text{mode}} \eta_{\text{del}} P_p}{h\nu_p V} \{1 - \exp[(f_b^p N_2 - f_a^p N_1) \sigma_p l]\} \quad (10)$$

$$\Gamma_l = \frac{P_{\text{seed}}}{h\nu_l V} \{ \exp[(f_b^l N_2 - f_a^l N_1) \sigma_l l] - 1 \} \quad (11)$$

式中: V 为激光模式体积; η_{mode} 为模式匹配系数; η_{del} 为泵浦传输效率; P_p 为泵浦功率; P_{seed} 为种子光输入功率; l 为晶体长度; h 为普朗克常数; ν_p 和 ν_l 分别为泵浦光和激光频率; σ_p 和 σ_l 分别为泵浦吸收和激光发射截面。

由公式(8)~(11)就可解出 N_1 、 N_2 , 将得到的 N_1 和 N_2 值代入下面的光放大公式就可以计算出放大后的激光输出功率:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{seed}} \{ \exp[(f_b^l N_2 - f_a^l N_1) \sigma_l l] - 1 \} \quad (12)$$

2.2 放大级部分结果讨论

假设种子光部分的输出功率为 15 W, 采用 MOPA 结构对其进行功率放大, 实验方案如图 8 所示。采用一级 MOPA 结构对种子光进行功率放大,

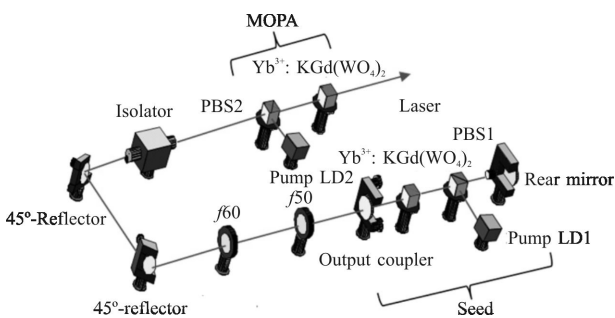


图 8 MOPA 结构示意图

Fig.8 Setup of the laser MOPA system

其中 PBS1 和 PBS2 为偏振分光棱镜, Output coupler 为输出耦合镜, Isolator 为隔离器, Pump LD1 和 Pump LD2 分别为种子光和放大部分的泵浦源, 图中使用了两个针对 1040 nm 波长的 45°全反镜。另外,

还使用了焦距为 50 mm 和 60 mm 的倒置望远镜系统对种子光进行扩束。

图 9 所示为晶体长度分别为 10、25 和 40 mm 时放大后的输出功率随泵浦功率的变化曲线。由图中可以看到, 在晶体长度为 10 mm 的情况下, 放大后的输出功率随泵浦功率变化呈先增大后饱和的趋势; 在所选晶体长度范围内, 当晶体长度变大时, 放大后的输出功率也逐渐增大。

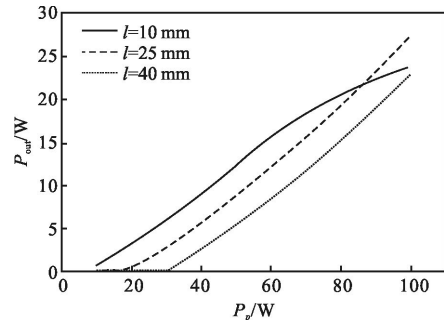


图 9 输出功率随泵浦功率的变化关系

Fig.9 Relationship between the output power and the pump power

图 10 所示为泵浦功率分别为 60、80 和 100 W 时放大后的输出功率随晶体长度的变化曲线。由图中可以看到, 输出功率随晶体长度变化呈先增大后减小的趋势, 晶体长度均存在着最佳值。当泵浦为 60 W 时, 最佳晶体长度约为 11 mm, 所对应的最大输出功率约为 15.6 W; 当泵浦为 80 W 时, 最佳晶体长度约为 13 mm, 所对应的最大输出功率约为 22.7 W; 当泵浦为 100 W 时, 最佳晶体长度约为 16 mm, 所对应的最大输出功率约为 30.5 W。最后选用 MOPA 系统中晶体的长度为 16 mm, 泵浦功率为 100 W, 以此实现对种子光进行功率放大, 并最终可以实现 30 W 左右的输出功率。

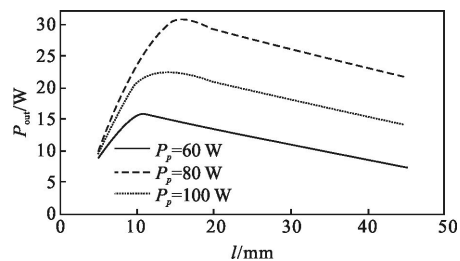


图 10 输出功率随晶体长度的变化关系

Fig.10 Relationship between the output power and the crystal length

文中所建准三能级理论模型主要基于 R. J. Beach 等所建立的常规三能级模型^[14], 另外还加入了

准三能级系统中的超精细结构粒子数分布比率等概念。但是,由于准三能级系统中存在着普通三能级系统中可以忽略的再吸收问题,因此文中所建立的理论模型存在着一定的误差。正在构建更加精确的理论模型来评估准三能级 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光的物理特性,相关研究成果将在以后正式发表。

3 结 论

文中建立了基于准三能级结构的半导体激光泵浦 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器微观动力学理论模型,分析了种子光的输出功率随泵浦功率、晶体长度和输出耦合镜反射率的变化规律,并在此基础上探讨了相应的 MOPA 功率放大结构,研究了放大后的输出功率随泵浦功率和放大级晶体长度的变化特性。通过该模型的理论分析可以看出,种子光和 MOPA 部分均存在着最佳的晶体长度,同时种子激光光源还存在着最佳的输出耦合镜反射率。这些结果都对将来构建实用化的 $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 激光器系统有着重要的理论指导意义。

参 考 文 献:

- [1] Zheng Wei, Yu Jianhua, Zhu Qiang. Influence of Q switch repetitive frequency on the thermal stability of diode side-pumped solid state lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 647–650. (in Chinese)
- [2] Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Huang Feng, et al. Simulated study of pumping beam's non-homogeneity in end-pumped composite slab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 402–406. (in Chinese)
- [3] Zheng Quan, Qian Ling, Qian Longsheng. Application and development of high power diode-pumped solid-state laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 1: 6–9. (in Chinese)
- [4] Shi Peng, Chen Wen, Li Long, et al. Influence of laser distribution on thermal effect of $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 2: 197–202. (in Chinese)
- [5] Dong Lei, Liu Xinyue, Chen Hao. Properties of pulse single-frequency laser and extra-cavity double frequency green laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 800–805. (in Chinese)
- [6] Shen Yanlong, Huang Ke, Ma Lianying, et al. Optical element stability of high power excimer laser MOPA system [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(1): 66–71. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Loiko P A, Filippov V V, Yumashev K V. 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.
- [9] Loiko P A, Kisel V E, Kondratuk N V, et al. 14 W high-efficiency diode-pumped cw $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser with low thermo-optic aberrations [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(1): 582–585.
- [10] Bowman S R, Jenkins N W, O' Connor S P, et al. Sensitivity and stability of a radiation-balanced laser system [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(10): 1339–1348.
- [11] Zhou Mu. Radiation balanced laser's theory and $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ fluorescence cooling laser's design [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 42–48. (in Chinese)
- [12] Biswal S, O' Connor S P, Bowman S R. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(15): 3093–3097.
- [13] Beach R J. CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators [J]. *Optics Communications*, 1995, 123(1): 385–393.
- [14] Beach R J, Krupke W F, Kanz V K, et al. End pumped continuous-wave alkali vapor lasers experiment, model, and power scaling [J]. *Opt Soc Amer B*, 2004, 21(12): 2151–2163.
- [15] Tso Yee Fan, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(5): 605–612.