

LD 泵浦的新型全固态 Yb:YAB 激光器光学特性的计算*

薛迎红¹,王清月²,柴路²,孙虹¹,张志刚²,宋晏蓉²,居桂方²

- (1. 天津大学理学院应用物理系教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072;
2. 天津大学精仪学院超快激光研究室教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072)

摘要:对一种新型自倍频激光晶体 Yb:YAB 的能级结构和光谱特性作了分析,利用准三能级的耦合速率方程,得出了 LD 端面泵浦条件下激光输出的解析表达式。讨论了晶体温度,晶体的有效光学长度,以及输出镜的反射率等因素对激光输出强度和发光阈值的影响。从理论上对 LD 端面泵浦的新型全固态 Yb:YAB 激光器的光学特性进行了系统的计算和分析。

关键词: Yb:YAB 晶体; 端面泵浦; 光学长度; 泵浦阈值; 速率方程

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)02-0125-04

Computation of optical characteristic on a novel all-solid-state Yb:YAB laser of LD pumped*

XUE Ying-hong¹, WANG Qing-yue², CHAI Lu², SUN hong¹,
ZHANG Zhi-gang², SONG Yan-rong², JU Gui-fang²

- (1. Optoelectronics Information Science and Technology Laboratory, Department of Applied Physics, Institute of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Ultrafast Laser Laboratory, Optoelectronics Information Science and Technology Laboratory, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The energy level structure and the spectral characteristic of a novel laser crystal Yb:YAB (Yb:YAl(BO₃)₄) are analyzed, and the analytic expressions of the laser output with CW end-pumping are achieved. The dependence of the output laser intensity and threshold on the temperature, the effective optical length of the crystal and the reflectivity of the output coupler are discussed.

Key words: Yb:YAB crystal; End-pumped; Optical length; Pumped threshold; Rate-equation

0 引言

近年来在二极管泵浦的激光材料研究中,以 Yb³⁺ 作为掺杂离子的激光材料已经引起了人们的普

遍关注。与在 1 μm 激光器中普遍应用的掺 Nd³⁺ 材料相比,掺 Yb³⁺ 激光材料的主要优点是它只有两个 4f 电子态,即²F_{7/2}基态和²F_{5/2}激发态。亚稳态的缺少避免了在掺 Nd³⁺ 介质中普遍存在的发光浓度淬灭、上转换损失和激发态吸收等缺陷。而且掺 Yb³⁺

收稿日期:2003-05-08; 修订日期:2003-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69978016,60178008);天津市自然科学基金资助项目(003800611);国家重点基础研究项目特别基金资助项目(G1999075201-2)。

作者简介:薛迎红(1978-),女,河北衡水人,硕士生,主要从事全固态飞秒脉冲激光器的研究工作。

比掺 Nd³⁺ 晶体的辐射寿命长得多,能够得到更高的泵浦效率,从而提高了激光转换功率^[1]。最近, YAG、BaCaBO₃F、KYW、KGW、GdCOB 以及 YCOB 等多种掺 Yb³⁺ 的激光晶体已经被报导。下面将介绍二极管端面泵浦的 Yb³⁺ YAl(BO₃)₄ (简称 Yb:YAB 激光器)。Yb:YAB 晶体是由山东大学成功开发的一种新型晶体,具有较宽的吸收带、较高的吸收系数和较大的发射荧光带宽,容易实现 1 μm 波段的半导体泵浦的全固化飞秒激光运转。此外它还具备优良的机械性能、热传导率及较大的非线性系数 ($d_{\text{eff}} > 1.4 \text{ pm/V}$)^[2]。目前国内还没有该晶体实现激光运转的成功经验,国外也没有这种激光器详细的理论证明的报导。根据 Yb:YAB 晶体的光谱和能级特性,从理论上对它在端面泵浦条件下的激光振荡器进行分析和优化,分析了晶体长度或者掺杂浓度、晶体温度以及输出耦合镜的反射率对激光输出强度的影响。

1 理论推导

1.1 能级结构

不掺杂的 YAB 是一种结构均匀的自然碳酸镁矿物 (Ca₂Mg₃(CO₃)₄),呈菱形,其空间群为 R₃₂。它提供了在 RM₃(BO₃)₄ 晶体序列中最大的非线性光学系数。对于 1 μm 的基频激光输出可以直接转化到倍频绿光,而不需要其他的非线性晶体^[3]。Yb:YAB 晶体在低温时 (< 20 K) 的 Stark 能级分裂如图 1 所示^[4]。它属于准三能级系统,激光和泵浦态都位于粒子数分别为 N₀ 和 N₁ 的两个空间簇内。假设每一

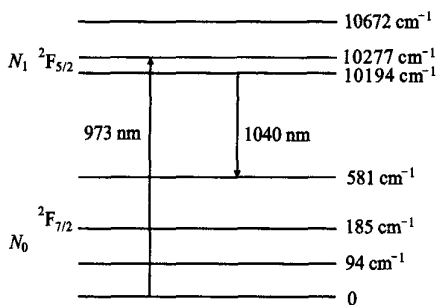


图 1 低温下 (< 20 K) Yb:YAB 晶体的 Stark 能级示意图

Fig. 1 Stark energy-level diagram of Yb:YAB crystal at low temperature (< 20 K)

簇内的 Stark 上能级粒子数占有比都可用 Boltzman 分布来描述(对于准三能级的 Yb:YAB 晶体,其光子

相互作用达到热力学平衡所需要的时间要比它的自发辐射寿命短得多,所以这种假定是合理的^[5])。因此其速率方程为^[6,7]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_0}{dt} = s_p(f_0^p N_0 - f_1^p N_1) \frac{I_p^+ + I_p^-}{h\nu_p} + s_l(f_0^l N_0 - f_1^l N_1) \frac{I^+ + I^-}{h\nu_l} - \frac{N_1}{\tau} \quad (1)$$

$$\frac{dI_p^\pm}{I_p^\pm} = s_p(f_0^p N_0 - f_1^p N_1) dz \quad (2)$$

$$\frac{dI^{\pm}}{I^{\pm}} = s_l(f_0^l N_0 - f_1^l N_1) dz \quad (3)$$

式中 I_l[±] 和 I_p[±] 是晶体内的激光和泵浦强度,上标“+”和“-”分别代表向前和向后的传播方向;s_p 和 s_l 分别表示晶体在泵浦光和激光波长的光谱吸收截面积;τ 为上能态的自发辐射寿命;f₁^p 和 f₀^p 分别表示泵浦光转化的高低泵浦态在上下两个簇内的 Boltzman 占有数因子;f₁^l 和 f₀^l 则分别表示激光转化的高低激光态在上下两个簇内的 Boltzman 占有数因子。

1.2 光谱特性

图 2 给出了掺杂浓度为 5.6 at% ,晶体长度为 1.3 mm 的 Yb:YAB 在室温下的吸收和发射光谱,从图 2 中可以看出,晶体的吸收有三个主峰,即 937、

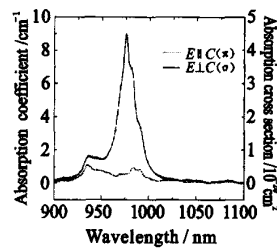


图 2 Yb:YAB 晶体在室温下的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectra of Yb:YAB crystal at room-temperature

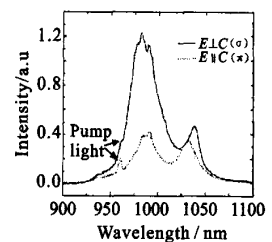


图 3 Yb:YAB 晶体在室温下的发射光谱
Fig. 3 Fluorescence spectra of Yb:YAB crystal at room-temperature

975 和 981 nm,在 975 nm 处的吸收截面积为 $3.4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,吸收带宽为 20 nm,这种吸收结构更有利于用高功率 InGaAs 激光二极管(980 nm)作泵浦源,以提高泵浦效率。图 3 示出了连续的 InGaAs 二极管泵浦样品的发射光谱,表明在 981~1050 nm 的范围内有较宽的荧光带,有利于 Yb:YAB 晶体输出激光的调谐和飞秒脉冲的产生。晶体在 1040 nm 的荧光寿命为 0.68 ms,发射截面积为 $0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。根据

这些参数,给出了激光振荡器的简略示意图,见图 4 (为方便起见,忽略短腔情况下晶体和腔镜的空间距离)。为了方便计算,假设晶体内部泵浦光和激光辐射的横向尺寸是均匀的,且温度沿着晶体的长度为一个常数。在稳定的 CW 输出时,通过分析可得以下边界条件:

$$I_1^-(z) I_1^+(z) = R_2 I_1^{+2}(l) \quad (4)$$

$$I_p^-(z) I_p^+(z) = R_p I_p^{+2}(l) \quad (5)$$

$$R_2 I_1^{+2}(l) = R_1 I_1^{-2}(0) \quad (6)$$

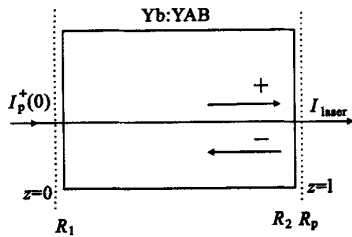


图 4 端面泵浦的 Yb:YAB 激光振荡器
Fig. 4 End pumped oscillator of Yb:YAB laser

对公式(1)、(2)、(3)进行积分得到:

$$s_1(f_0^1 + f_1^1) \ln \frac{I_p^\pm(z)}{I_p^\pm(0)} - s_p(f_0^p + f_1^p) \ln \frac{I_1^\pm(z)}{I_1^\pm(0)} = -\Delta N_t s_1 s_p z \quad (7)$$

$$\mu \frac{\Delta}{h\nu_p} \left[(I_p^\pm(z) - I_p^\pm(0)) \mu R_p I_p^{\pm 2}(l) \frac{I_p^\pm(0) - I_p^\pm(z)}{I_p^\pm(0) I_p^\pm(z)} \right] \pm \frac{f_0^1}{s_p \tau} \ln \frac{I_p^\pm(z)}{I_p^\pm(0)} = -\frac{\Delta}{h\nu_l} \left[(I_1^\pm(z) - I_1^\pm(0)) + R_2 I_1^{\pm 2}(l) \times \frac{I_1^\pm(0) - I_1^\pm(z)}{I_1^\pm(0) I_1^\pm(z)} \right] + \frac{f_0^p}{s_1 \tau} \ln \frac{I_1^\pm(z)}{I_1^\pm(0)} \quad (8)$$

式中 $\Delta = f_0^p f_1^1 - f_1^p f_0^1$ 。利用边界条件即公式(4)、(5)、(6),对公式(7)进行积分可得到晶体前后泵浦光输入和输出强度的关系:

$$I_p^+(l) = I_p^+(0) \exp(De) \quad (9)$$

$$De = -s_p \frac{\Delta}{f_0^1 + f_1^1} N_t l + \frac{s_p}{s_1} \frac{f_0^p + f_1^p}{f_0^1 + f_1^1} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \quad (10)$$

公式(9)、(10)即表示泵浦光通过介质的单程损耗,从公式(10)可以看出,泵浦光的损耗来源于两个方面:(1)晶体对泵浦光的吸收损耗(公式(10)的第一项),它不但和增益介质本身的性质有关,还依赖于外界温度。Yb:YAB 晶体对泵浦光的吸收截面很大,而且即使掺杂浓度很高时,也没有浓度淬灭的现象。计算表

明,在同一温度下,当吸收达到某一强度时,激光输出强度与吸收强度成线性关系。图 5 给出了 13 °C 时计算的理论与参考文献[8]中实验结果的对比图(点划线是实验值)。因为实际的实验条件不可能达到理想的优化条件,所以实验值比理论值偏低,从而也表明如果能进一步改善实验条件将提高晶体的量子效率。这一特性为实现紧凑、小型化的激光器提供了先决条件。(2)激光场的变化(公式(10)第二项)取决于晶体的性质和振荡器的性能。

2 结果与讨论

利用公式(9)、(10)和边界条件公式(4)、(5)、(6),解公式(8),得到泵浦光输入强度和激光输出强度之间的关系为:

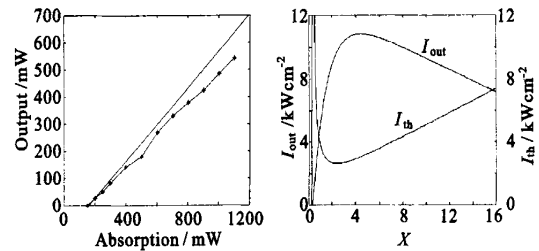


图 5 激光输出随吸收强度的变化
图 6 激光输出和阈值随有效光学长度的变化
Fig. 5 Laser output intensity as a function of absorbed intensity
Fig. 6 Laser output intensity and laser threshold as a function of optical crystal length

$$I_{out} = \eta_{slope} (I_p^+(0) - I_{th}) \quad (11)$$

$$\text{式中 } \eta_{slope} = \frac{1 - R_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2}) \left(1 + \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}} \right) (1 + R_p e^{De})} \frac{\eta}{\nu_p} (1 - e^{De}) \times \quad (12)$$

是光学转换的量子效率; I_{th} 为晶体的泵浦阈值,由下式决定:

$$I_{th} = \frac{h\nu \left[\frac{f_0^1}{f_0^1 + f_1^1} N_t l + \frac{1}{s_1(f_0^1 + f_1^1)} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right]}{\frac{\eta}{\nu_p} (1 - e^{De}) (1 + R_p e^{De})} \quad (13)$$

计算中发现晶体的有效光学长度 $X = N_t s_p l$ 是一个无量纲的量(其中, N_t 为 Yb^{3+} 在晶体中的总的掺杂浓度; s_p 为晶体对泵浦光波长的吸收面积; l 为晶体

长度),为此可以把它作为一个量看待,图 6 示出了晶体温度为 13 °C、泵浦光强度为 15 kW/cm² 时,激光的输出强度和激光阈值随晶体有效光学长度的函数变化关系。其中前后镜对激光的反射率分别为: $R_2 = 0.96$, $R_1 = 1$, 前镜对泵浦光的反射率为 $R_p = 0.93$ 。从图 6 可以看出,存在一个最佳的晶体有效光学长度,使得激光输出强度最大,但是,它远离使激光的阈值最低的晶体有效光学长度。对公式(11)、(12)、(13)求导可以得到最佳的有效光学长度:

$$N_{t,s_p} l \Big|_{\text{opt}} = \frac{f_0^l + f_1^l}{\Delta} \left[\frac{s_p}{s_1} \frac{f_0^p + f_1^p}{f_0^l + f_1^l} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{h\nu f_0^l}{s_p \tau \Delta I_p^+(0)} \right) \right] \quad (14)$$

图 7 示出激光输出强度随输出耦合镜的反射率的变化曲线。其中,输入泵浦光强度为 15 kW/cm², 取最佳有效的晶体光学长度为 3.5, 晶体温度为 286 K。

为了便于计算,将腔内损耗的计算都包括于后镜的透射中。忽略晶体和腔镜的散射和吸收损耗,图 7 表明,在损耗一定的情况下,耦合输出镜有一个最佳的反射率使激光输出强度最大。由于损耗的减少,激光输出强度随耦合输出镜反射率的增加迅速增加。当损耗从 5% 减少到 1% 时,输出强度最佳值增加 20%。已知晶体和腔镜可以通过镀膜和减少杂质等方法将损耗减少到 1%,但是激光腔的几何损耗和模式失配带来的损耗可能达到 5%,为此,要增加激光输出强度则应该减少这两方面的损耗。

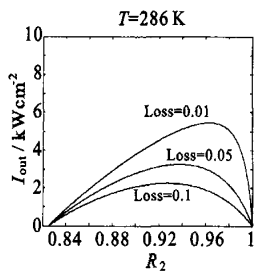


图 7 激光输出强度随耦合输出镜反射率的变化
Fig. 7 Laser output intensity as a function of the reflectivity of an output coupler

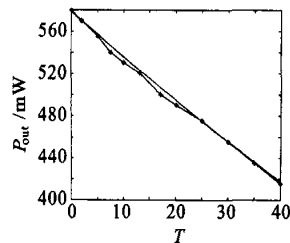


图 8 激光输出强度随温度的变化
Fig. 8 Laser output intensity as a function of temperature

有关实验值(图 8 中的点划线)^[8]表明当温度升高时激光输出强度减小,为此文中分析了激光输出强度随温度的变化,如图 8 所示。设耦合输出镜对激光

的反射率 $R_2 = 0.96$, 对泵浦光的反射率 $R_p = 0.93$, 后镜对激光的反射率 $R_1 = 0.998$ 。晶体的有效光学长度为 1.4, 输入的泵浦功率为 1.5 W。计算中假设温度不随晶轴变化,图 8 表明随着温度的增加输出激光强度线性下降。这是由于温度的增加使激光上能级的粒子数减少,文中体现为 f_1^l 的减少和 f_0^l 的增加,所以输出强度变小。因此对于该晶体,要获得较大的输出,晶体温度要控制在低温状态下。

3 结论

分析了一种新型的激光晶体 Yb:YAB 的能级和光谱特性以及它在 LD 端面泵浦条件下的耦合速率方程,得出了解析表达式。通过计算,得出了晶体的有效光学长度、晶体温度以及不同损耗时输出镜的反射率对激光输出的影响,该理论为 LD 泵浦的全固态准三能级激光系统设计和优化提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6):1457-1459.
- [2] Wang Pu, Dekker Peter, Dawes M Judith, et al. Efficient CW self-frequency-doubling green diode-pumped Yb:Yal₃(BO₃)₄[J]. Optics Letters, 2000, 25(10):731-733.
- [3] Filimonov A A, Leonyuk N I, Meissner L B, et al. Nonlinear optical properties of isomorphic family of crystal with yttrium aluminium borate(YAB) structure[J]. Krist Tech, 1974, 9(1):63-66.
- [4] Wang Pu, Dawes M Judith, Detter Peter, et al. Growth and evaluation of ytterbium-doped yttrium aluminum borate as a potential self-doubling laser crystal [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(1):63-69.
- [5] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs diode *pumped Yb:YAG lasers [J]. IEEE J Select Topics Quantum Electron, 1997, 3(1):105-116.
- [6] Bourdet Gilbert L. Theoretical investigation of quasi-three-level longitudinally pumped continuous wave lasers [J]. Applied Optics, 2000, 39(6):966-971.
- [7] Lim Chaghwan, Izawa Yasukazu. Modeling of end-pumped CW quasi-three-level lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(3):306-311.
- [8] Pu Wang, Judith M Daawes, Petter Dekker, et al. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminum borate laser [J]. Optics Communications, 2000, 174(5-6):467-470.