

高重复 Ho:YAG 激光器转换效率理论分析与计算

朱国利

中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047

摘要 Ho:YAG 晶体因其优良的机械性能及光谱特性,成为高重复 2 μm 激光器的可选晶体之一。为获得高效率、高功率、高重复 2 μm Ho:YAG 激光器,分析了单掺 Ho³⁺激光器的发光机理,从速率方程出发建立了高重复 Ho:YAG 激光器转换效率的计算模型,利用该模型分析了输出镜透射率、激光模式大小、抽运-激光模式比和离子掺杂浓度等参数对高重复 Ho:YAG 激光器转换效率的影响,并提出了参数设计范围,通过实验对理论模拟结果进行了验证。

关键词 激光器; Ho:YAG 激光器; 2 μm 激光; 转换效率; 高重复频率

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP42.0802014

Analysis and Calculation of Conversion Efficiency in High-Repetition-Frequency Ho:YAG laser

Zhu Guoli

The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou, Henan 450047, China

Abstract With good machine performance and spectrum characteristic, Ho:YAG crystal has become one of the choices for high-repetition-frequency 2 μm laser. In order to acquire high efficiency and high power 2 μm Ho:YAG laser with high-repetition-frequency, radiation mechanism of singly-doped Ho³⁺ laser are analyzed. And the calculation model of conversion efficiency in high-repetition-frequency Ho:YAG laser is established through rate equation. The effects of the parameters such as output coupler transmittance, laser mode size, ratio of pump-laser mode and Ho-doping atomic number fraction, on the conversion efficiency in high-repetition-frequency Ho:YAG laser are analyzed by this calculation model. The design scope of those parameters is also put forward. The theoretical simulation results are verified through experiments.

Key words lasers; Ho:YAG laser; 2 μm laser; conversion efficiency; high-repetition-frequency

OCIS codes 140.3410; 140.3480; 140.3540; 140.3580.

1 引 言

自从 20 世纪 60 年代研究者对掺 Ho³⁺激光器进行介绍之后^[1-3],国际上对掺 Ho 激光器进行了大量的研究工作,并在激光器输出功率、转换效率和激光器设计方面取得了很大的进步。Ho³⁺特殊的光谱特性,如长的激光上能级寿命,可以获得人眼安全和大气透射率高的 2 μm 激光等,使它成为产生激光的重要离子。2 μm 激光在医学、军事、机械加工和遥感等方面均有重要的应用^[4-6]。特别地,2 μm 激光可通过抽运非线性晶体有效获得光电对抗源中红外 3~5 μm 激光和远红外 8~12 μm 激光^[7-9]。

为了实现高重复频率 Ho:YAG 激光器的高效率运行,从单掺 Ho³⁺激光器的速率方程出发建立了转换效率分析模型,对输出镜透射率、激光模式大小、抽运-激光模式比和离子掺杂浓度等影响转换效率的参数进行了理论分析与计算。

2 单掺 Ho 激光器转换效率计算模型的建立

2.1 单掺 Ho³⁺激光器的能级跃迁

单掺 Ho³⁺激光系统为准二能级系统^[10-13],跃迁示意图如图 1 所示,⁵I₈态斯塔克能级上的粒子吸收抽运光

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-05-26

作者简介: 朱国利(1982—),男,博士,工程师,主要从事 2 μm 及 3~5 μm 固体激光器方面的研究。

E-mail: zgbzgl1982@163.com

被激发到⁵I₇态斯塔克能级上,然后被激发的Ho³⁺离子再从⁵I₇态斯塔克能级上跃迁到⁵I₈态的斯塔克能级上,这个过程中产生激光。

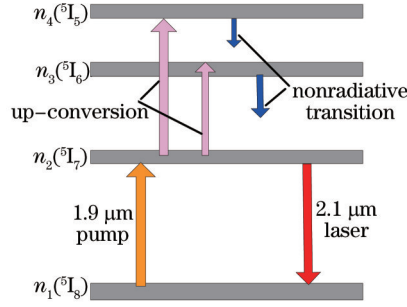


图1 Ho:YAG 晶体中Ho³⁺产生2.1 μm激光的能级跃迁示意图

Fig.1 Schematic of energy processes involved in 2.1 μm holmium lasers

准二能级系统的量子损耗小,使得激光器能够高效运行,并且产生热量少,对于Ho:YAG激光器来说,通常小于抽运功率的10%。由于这些优势,单掺Ho³⁺晶体可以在常温条件下获得高功率的2.1 μm激光。

2.2 单掺Ho³⁺激光器速率方程

建立速率方程对激光器的输出特性进行分析是一种常用的方法。本节将参考相关文献建立Ho:YAG激光器准连续模式运转下的速率方程模型,为Ho:YAG激光器转换效率的分析提供理论基础。

带内抽运发射2.1 μm激光的Ho³⁺激光系统如图1所示,标记四个能级上的粒子数密度分别为 n_1 , n_2 , n_3 和 n_4 ,总的粒子数密度标记作 n_{Ho} 。这样,可以得到Ho³⁺能级系统的速率方程^[14]:

$$\frac{dn_2}{dt} = R_2 r_p(r, z) - 2k_{2421}n_2^2 - 2k_{2321}n_2^2 + 2k_{4212}n_4n_1 + 2k_{3212}n_3n_1 + \beta_{42}\frac{n_4}{\tau_4} + \beta_{32}\frac{n_3}{\tau_3} - \frac{n_2}{\tau_2} - \frac{\sigma_{e, Ho}c}{n}(f_{u, Ho}n_2 - f_{l, Ho}n_1)\Phi_{Ho}j_{Ho}(r, z), \quad (1)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = k_{2321}n_2^2 - \frac{n_3}{\tau_3} + \beta_{43}\frac{n_4}{\tau_4} - k_{3212}n_3n_1, \quad (2)$$

$$\frac{dn_4}{dt} = k_{2421}n_2^2 - \frac{n_4}{\tau_4} - k_{4212}n_4n_1, \quad (3)$$

$$\frac{d\Phi_{Ho}}{dt} = \frac{\sigma_{e, Ho}c}{n} \iiint_{cavity} (f_{u, Ho}n_2 - f_{l, Ho}n_1)\Phi_{Ho}j_{Ho}(r, z)dv - \frac{\Phi_{Ho}}{\tau_c}, \quad (4)$$

$$n_1 = n_{Ho} - n_2 - n_3 - n_4, \quad (5)$$

式中 τ_i 为自发辐射寿命, k_{ijkl} 为能量转移过程, R_i 为抽运速率, Φ_{Ho} 为腔内总的光子数密度, c 为光速, $r_p(r, z)$ 为抽运光的归一化光子分布函数, $j_{Ho}(r, z)$ 为激光的归一化光子分布函数, n 为晶体折射率, β_{ij} 为荧光分支比, $f_{u, Ho}$ 和 $f_{l, Ho}$ 分别是激光上、下能级的波尔兹曼常数, $\sigma_{e, Ho}$ 为Ho³⁺离子的受激发射截面, τ_c 为腔内光子寿命。

通常Ho³⁺的激光上能级寿命比它的更高能级长2~3个量级,在计算时可以忽略高于激光上能级的粒子数影响,即 $n_1 \approx n_{Ho} - n_2$ 。这样, Ho³⁺上能级速率方程可以简化为

$$\frac{dn_2}{dt} = Rr_p(r, z) - k_2n_2^2 - \frac{n_2}{\tau} - \frac{\sigma_c c}{n}[(f_u + f_l)n_2 - f_l n_{Ho}]\Phi j(r, z), \quad (6)$$

式中 k_2 表示总的上转换损耗系数,这个参数可以通过计算获得^[15]。

抽运速率 R 可以表示为

$$R^0 = \frac{\eta_p \eta_\alpha P_p}{h\nu_p} = \frac{\eta_p P_p}{h\nu_p} [1 - \exp(-\alpha_0 l)], \quad (7)$$

式中 η_p 为抽运量子效率, η_α 为抽运吸收比例, P_p 为抽运功率, α_0 为激光介质在抽运波长处的吸收系数, l 为晶体厚度。

考虑到基态损耗,吸收系数和上能级粒子数密度的关系为

$$\alpha = \sigma_\alpha(n_{Ho} - n_2) = \alpha_0 \left(1 - \frac{n_2}{n_{Ho}}\right), \quad (8)$$

$$R = R^0 \left(1 - \frac{n_2}{n_{Ho}}\right), \quad (9)$$

其中 σ_a 为激光介质在抽运波长处的有效吸收截面。

在计算时,假定激光和抽运光都是高斯分布,则

$$r_p(r, z) = \frac{2\alpha \exp(-\alpha z)}{\pi\omega_p^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_p^2}\right), \quad (10)$$

$$j(r, z) = \frac{2}{\pi\omega_1^2 l_c^*} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_1^2}\right), \quad (11)$$

式中 l_c^* 为谐振腔光学长度, ω_p 和 ω_1 分别为抽运光与激光光束的半径大小,并假设激光光束半径在晶体内不变,恒为激光束腰半径 ω_{10} , 抽运光斑半径在晶体内随 z 轴变化可以表示为

$$\omega_p = \omega_{p0} \sqrt{1 + \left[\frac{(z - z_0)M^2 \lambda_p}{\pi\omega_{p0}^2}\right]^2}, \quad (12)$$

式中 ω_{p0} 为抽运光斑半径, z_0 为抽运光束腰相对于晶体前端面的位置, M^2 为光束质量因子, λ_p 为抽运光波长。

且

$$l_c^* = l_c + (n - 1)l, \quad (13)$$

$$\tau_c = \frac{2l_c^*}{c\delta}, \quad (14)$$

式中 δ 为腔内往返损耗, l_c 为谐振腔物理长度。为了表达输出镜透射率对激光器输出功率的影响,将 δ 表示为

$$\delta = \delta' + T, \quad (15)$$

式中 T 为输出镜的腔内损耗, δ' 为除输出镜以外其他的腔内损耗。

双端抽运时,另一端的抽运光分布可表示为

$$\omega'_p = \omega'_{p0} \sqrt{1 + \left[\frac{(l - z - z'_0)M'^2 \lambda_p}{\pi\omega'_{p0}{}^2}\right]^2}, \quad (16)$$

$$r'_p(r, z) = \frac{2\alpha \exp[-\alpha(l - z)]}{\pi\omega'^2_p [1 - \exp(-\alpha l)]} \exp\left[-2\frac{r^2}{\omega'^2_p}\right]. \quad (17)$$

激光器在稳态运行的时候, $\frac{dn_2}{dt} = 0$, $\frac{d\Phi}{dt} = 0$, 再结合(4)式和(6)~(17)式,即可根据晶体参数、谐振腔参数和抽运光分布,对激光的转换效率进行计算。

2.3 计算模型参数假定

参考相关文献,模型计算时设定的参数值如表1所示,以下根据表1中的参数,分析输出镜透射率、激光模式大小、抽运-激光模式比和晶体一定时长度离子掺杂浓度对激光器转换效率的影响。

表1 Ho:YAG模型参数^[16]

Table 1 Initial parameters of theoretical model

Parameter	Value
l /mm	50
n	1.82
$\sigma_{e-\text{Ho}}$ /cm ²	10 ⁻¹⁹
σ_a /cm ²	1.2×10 ⁻²⁰
$f_{u-\text{Ho}}$	0.0994
$f_{l-\text{Ho}}$	0.017
τ_i /ms	8
δ	1%
η_p	1
l_c /mm	150
z_0 /mm	25
k_{Σ} /(cm ³ /s)	0

考虑到所要设计的激光器工作重复频率在 10 kHz 左右,为准连续状态,调 Q 模式和连续工作模式下平均功率大体相同,在分析激光器性能时,将以 Ho:YAG 连续激光器速率方程模型为基础进行分析。

3 转换效率计算与分析

3.1 输出镜透射率对转换效率的影响

输出镜透射率不但影响激光器阈值,而且影响激光器的转换效率,是谐振腔设计中的一个重要因素。在输出镜透射率的分析设计中,不但要考虑其对激光器阈值及转换效率的影响,还要考虑不同透射率时腔内能量的多少。腔内能量高时由于光学元件损伤速度加快会相应缩短激光器寿命,因而在保证效率或兼顾效率的同时应该尽量增大输出镜透射率。

根据速率方程模型和表 1 中给出的参数可以得到输出镜不同透射率情况下的激光器转换效率,如图 2 所示。可知,20%透射率时激光器转换效率最高;10%和 30%透射率时激光器转换效率几乎一样,略低于 20%透射率时的输出效果;40%以上透射率时,激光器转换效率明显降低。

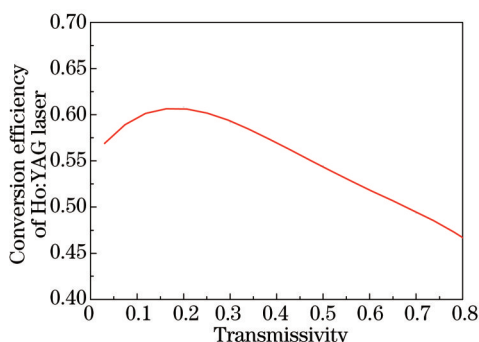


图 2 Ho:YAG 激光器转换效率与输出镜透射率的理论关系

Fig.2 Theoretical conversion efficiency of Ho:YAG laser versus output coupler transmittance

考虑到调 Q 模式下激光器内部峰值功率较高,为保证激光器长期稳定运行,要求激光器输出镜透射率越高越好,但同时要考虑激光器效率因素。参考图 2 中的模拟结果,由于在激光器输出镜透射率 40% 情况下,激光器转换效率与最优效果接近,因此理论上其可以作为调 Q 模式下激光器输出镜透射率参数。

3.2 激光模式大小对转换效率的影响

与输出镜透射率相似,激光模式大小也是激光器设计中必须要考虑的因素。激光模式大小不但影响阈值而且影响转换效率。在激光模式大小的设计中,还要考虑晶体损伤阈值、晶体长度、最大抽运功率等因素。在兼顾晶体安全和激光器效率的情况下应尽量减小抽运光斑从而减小激光器阈值,获得最高的输出功率;晶体长度会制约抽运光的瑞利长度,从而制约抽运光斑的大小,进而约束激光光斑的大小;考虑最大抽运效率其实也是考虑晶体损伤问题,抽运功率高,就不能用过小的抽运光斑,因为必须要考虑晶体的损伤阈值。因此,在兼顾激光器转换效率的同时还必须考虑晶体损伤阈值、晶体长度和最大抽运功率等因素。

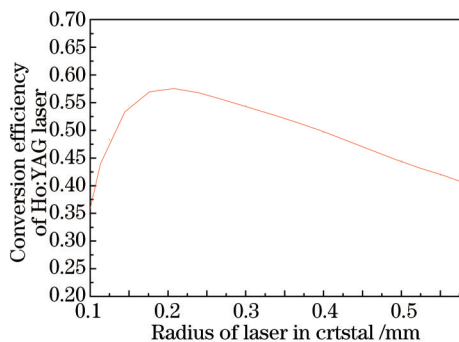


图 3 Ho:YAG 激光器转换效率与激光模式大小关系

Fig.3 Theoretical conversion efficiency of Ho:YAG laser versus laser mode size

根据速率方程模型和表 1 中给出的参数可以得到不同激光模式半径情况下的激光器转换效率,如图 3 所示。可知,激光半径为 0.20 mm 时激光器转换效率最高;半径为 0.25 mm 时与 0.20 mm 时输出效果接近;半径为 0.15 mm 与 0.30 mm 时激光器转换效率几乎相同,输出效果比 0.20 mm 和 0.25 mm 时稍差;半径为 0.10 mm 时输出效果最差。

参考图 3 中模拟的数据,可知激光半径在 0.15~0.30 mm 之间时,激光器转换效率变化较小,且接近最优效果,因此在选择激光模式半径参数时,应在 0.15~0.30 mm 之间进行选取。

3.3 抽运-激光模式比对转换效率的影响

抽运-激光模式比是近几年才开始关注的问题,之前认为其值为 1:1 时最好,这样可以实现模式匹配,而且激光器转换效率最高,可以保证激光的光束质量。但近几年的研究发现,抽运-激光模式比 1:1 并不是所有激光器转换效率最高时的参数。之前忽略了一个很重要的因素—抽运光的强度分布,抽运光和激光都是高斯基模情况下可以按模式匹配来设计抽运系统,但对于近平顶分布的半导体激光和光束质量比较差的非基模抽运光,模式匹配就不能简单地按经典方法实现,而是需要在速率方程模型中考虑抽运光强度分布,以转换效率的理论分析值作为参考来设计抽运-激光模式比,从而确定抽运单元的参数。

根据速率方程模型和表 1 中给出的参数可以得到不同抽运-激光模式比情况下的激光器转换效率,如图 4 所示。可知,抽运-激光模式比为 0.9 时激光器转换效率最高;抽运-激光模式比在 0.8~1.0 之间时激光器转换效率变化较小;抽运-激光模式比大于 1.0 之后激光器转换效率下降速度较快。

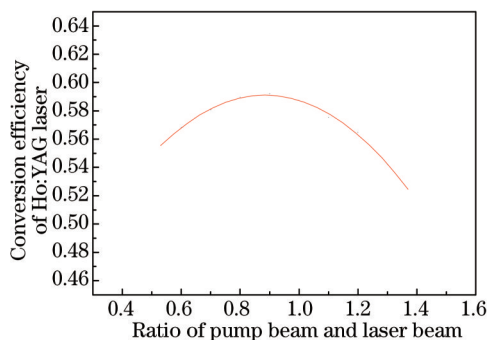


图 4 Ho:YAG 激光器转换效率与抽运-激光模式比的关系

Fig.4 Theoretical conversion efficiency of Ho:YAG laser versus the ratio of pump-laser mode

参考图 4 中模拟的数据可知,抽运-激光模式比在 0.8~1.0 之间时,激光器转换效率变化缓慢,均接近最优效果,因此在选择抽运-激光模式比时,应在 0.8~1.0 之间进行选取。

3.4 离子掺杂浓度对转换效率的影响

YAG 晶体属于立方晶系,为单轴晶体,光学各向同性,这种立方晶系结构的晶体在高功率激光抽运时会引起热致双折射现象,进而导致退偏损耗的增大,这也是 YAG 晶体的一个缺陷。对于单掺 Ho³⁺的 YAG 晶体来说,激光系统为准二能级系统,抽运光波长为 1.9 μm,激光波长为 2.1 μm,量子亏损极少,晶体产生的热量非常小,热致双折射效应和热透镜效应很弱。

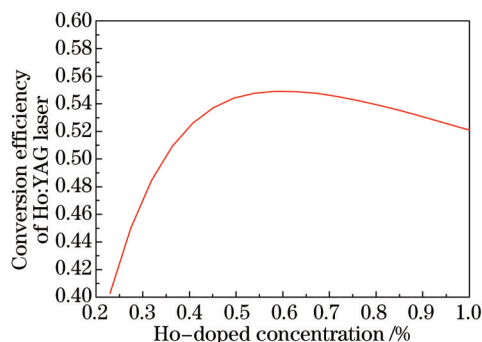


图 5 Ho:YAG 激光器转换效率与离子掺杂浓度的理论关系

Fig.5 Theoretical conversion efficiency of Ho:YAG laser versus Ho-doping concentration

根据速率方程模型和表 1 中给出的参数可以得到不同离子掺杂浓度情况下的激光器转换效率,如图 5 所示。可知,掺杂原子数分数为 0.6% 时转换效率最高;掺杂原子数分数在 0.5%~0.7% 之间变化时激光器转换效率几乎不变;掺杂原子数分数小于 0.5% 或大于 0.7% 时激光器转换效率下降速度变快。经过分析可知,掺杂原子数分数较低时激光器输出性能比较差的原因为晶体吸收系数小,抽运光利用率低,而掺杂原子数分数较高时激光器输出性能差的原因为激光再吸收损耗较高。

参考图 5 中模拟的数据可知,掺杂原子数分数在 0.5%~0.7% 之间时,激光器出光性能最优,因此在选择激光掺杂原子数分数时,可以在 0.5%~0.7% 之间进行选取。

4 实验与分析

4.1 实验装置

图 6 所示为单晶体 Ho:YAG 激光器实验装置示意图。其中, Ho:YAG 激光器的谐振腔由三种腔镜组成: 0° 二色镜、45° 二色镜、平凹输出镜。0° 平面镜作为激光全反镜,对 1.9 μm 抽运光高透,对 2.1 μm Ho:YAG 振荡光高反; 45° 二色镜镀 45° 1.9 μm 抽运光高透且 2 μm 波段振荡光高反膜; 平凹输出镜对激光透射率为 50%。激光谐振腔腔长为 150 mm,激光晶体长度为 50 mm,激光光斑半径为 0.3 mm,抽运光束腰位于晶体中心,距激光晶体端面 25 mm,抽运-激光模式比约为 1.0, Ho³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%。调 Q 晶体靠近平凹输出镜端,实验中所用的调 Q 驱动源输出信号为 25 W、41 MHz 的射频信号,开门时间为 4 μs。

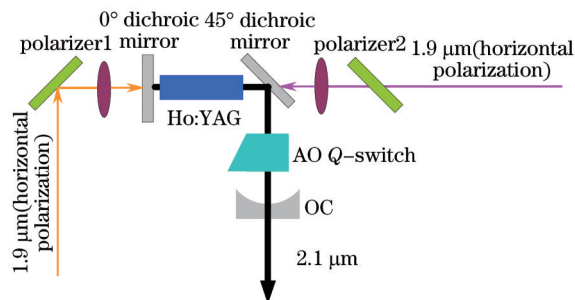


图 6 单晶体 Ho:YAG 激光器实验装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the single-crystal Ho:YAG laser

在对 Ho:YAG 晶体双端单程抽运中,利用了偏振隔离技术来避免两端的抽运光相互干扰。偏振隔离技术具体实施方法如下:首先要求两端的抽运光分别为水平方向偏振和垂直方向偏振,这样偏振片按照一定角度放置时就可以对一边的垂直偏振光高反而对另一边的水平偏振光高透。如图 6 所示,偏振片 1 对左边的垂直偏振光高反同时对反方向剩余的水平偏振光高透,偏振片 2 对右边的水平偏振光高透同时对反方向剩余的垂直偏振光高反,这样,可以有效解决双端抽运时的相互干扰问题。

4.2 实验结果与分析

图 7 所示为 Ho:YAG 激光器输出功率与注入抽运功率的关系,当激光器工作在连续模式下,注入的 1.9 μm 抽运光为 61.6 W 时,可获得 33.6 W 的 2.1 μm 激光输出,线性拟合可得激光器的斜率效率为 59.1%,光-光

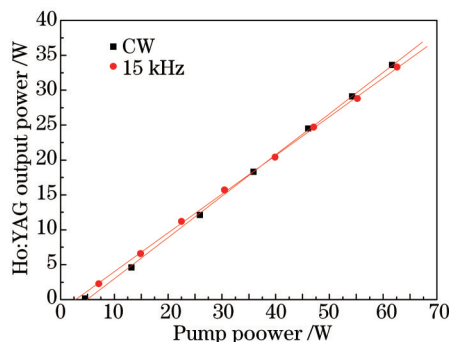


图 7 Ho:YAG 激光器输出功率与抽运功率的关系

Fig.7 Output power versus pump power in Ho:YAG laser

转换效率为 54.5%。当工作在重复频率为 15 kHz 调 Q 模式下,当注入的 1.9 μm 抽运光为 62.6 W 时,可获得 33.3 W 的 2.1 μm 激光输出,线性拟合可得激光器的斜率效率为 55.5%,光-光转换效率为 53.2%。

激光器连续工作模式下光-光转换效率为 54.5%,调 Q 模式 15 kHz 重复频率下,光-光转换效率为 53.2%,相差 1.3%。因而,在分析高重频 Ho:YAG 激光器转换效率时,以 Ho:YAG 连续激光器速率方程模型为基础进行分析是可行的。

根据 Ho:YAG 激光器谐振腔参数、晶体参数与模型计算中其他假定参数模拟计算可知,激光器转换效率为 54.8%,比连续工作模式下的实际光-光转换效率 54.5% 高 0.3%,比调 Q 模式 15 kHz 重复频率下实际光-光转换效率 53.2% 高 1.6%。理论计算结果与实验结果基本吻合。

通过对比理论模拟结果与实验结果可知,在分析高重频 Ho:YAG 激光器转换效率时,以 Ho:YAG 连续激光器速率方程模型为基础进行分析是可行的,而且模拟计算结果与实际结果基本吻合,具有可参考性。

5 结 论

从速率方程出发建立了连续模式下单掺 Ho³⁺ 激光器速率方程模型,从理论上分析了输出镜透过率、激光模式大小、抽运-激光模式比和离子掺杂浓度对准连续 Ho:YAG 激光器转换效率的影响,获得了 Ho:YAG 激光器高效率运行的谐振腔参数和晶体参数,并通过实验对理论模拟结果进行了验证。研究结果为高重频、高功率 Ho:YAG 激光的研制提供了理论指导。

参 考 文 献

- 1 R H Hoskins, B H Soffer. $^8\text{B}_7$ -energy transfer and CW laser action in Ho³⁺:Er₂O₃[J]. IEEE J Quantum Electron, 1966, 2(8): 253-255.
- 2 R Remski, L James, K Goen, *et al.*. Pulsed laser action in LiYF₄:Er³⁺, Ho³⁺ at 77K[J]. IEEE J Quantum Electron, 1969, 5(5): 214.
- 3 A C Everitt, E D Fletcher. The performance of the Ho³⁺ in yttrium aluminium garnet laser[C]. Mullard Research Laboratories Annual Review, 1969, 174571: 28.
- 4 Li Linjun, Zhang Zhiguo, Bai Yunfeng, *et al.*. Progress and prospect on Tm, Ho:YAlO₃ laser at 2 μm wavelength[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 070003.
李林军,张治国,白云峰,等. 2 μm 波段 Tm, Ho:YAlO₃ 激光器研究进展及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 070003.
- 5 Zhu Yadong, Zhou Pu, Zhang Hanwei, *et al.*. Analysis of maximum extractable power of 2 μm holmium-doped silica fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0614004.
朱亚东,周 朴,张汉伟,等. 2 μm 硅基掺钬光纤激光器极限功率分析[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0614004.
- 6 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber lasers at 2 μm wavelength[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601002.
王 璞,刘 江. 2 μm 掺钬超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0601002.
- 7 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702006.
魏 磊,肖 磊,韩 隆,等. Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光参量振荡器[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702006.
- 8 He Lijie, Hou Tianyu, Wei Lei, *et al.*. Experimental study on mid-infrared ZGP optical parametric oscillator[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9): 991-993.
何利杰,侯天禹,魏 磊,等. 中红外磷锗锌光参量振荡器实验研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 991-993.
- 9 Han Long, Yuan Ligang, Wei Lei, *et al.*. 8 μm OPO pumped by Tm:YAP laser[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1124-1126.
韩 隆,苑利刚,魏 磊,等. Tm:YAP 激光器泵浦 8 μm 光参量振荡器[J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1124-1126.
- 10 S R Bowman, B J Feldman. Demonstration and analysis of a Holmium quasi-two level laser[C]. SPIE. 1992, 1627: 46-54.
- 11 P Peterson, A Gavrielides, P M Sharma. CW theory of a laser diode-pumped two-manifold solid state laser[J]. Opt Commun, 1994, 109(3-4): 282-287.
- 12 V Lupei, G Aka, D Vivien. Highly efficient, 0.84 slope efficiency, 901 nm, quasi-two-level laser emission of Nd in strontium lanthanum aluminate[J]. Opt Lett, 2006, 31(8): 1064-1066.
- 13 J E Hellström, B Jacobsson, V Pasiskevicius, *et al.*. Quasi-two-level Yb:KYW laser with a volume Bragg grating[J]. Opt Express, 2007, 15(21): 13930-13935.
- 14 E K Gorton, J G Betterton, D A Orchard, *et al.*. CW and temporal theoretical model predictions and experimental results for Tm:

- YAG and Ho:YAG lasers[C]. SPIE, 2008, 7115: 71150U.
- 15 G Rustad, K Stenersen. Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for up-conversion and ground-state depletion [J]. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(9): 1645-1656.
- 16 S A Payne, L L Chase, Larry K Smith, *et al.*. Infrared cross - section measurements for crystals doped with Er^{3+} , Tm^{3+} , and Ho^{3+} [J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(11): 2619-2630.

栏目编辑：宋梅梅