

Cr⁴⁺ : YAG 固体激光器效率的理论分析*

余先伦^{1,2} 杨伯君² 于 丽²

(1 重庆三峡学院电子工程系, 重庆万州 404000)

(2 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

摘 要 对 Cr⁴⁺ : YAG 固体激光器的吸收效率、量子效率、储存效率和提取效率等本征效率进行了分析. Cr⁴⁺ : YAG 晶体的吸收截面、发射截面、上能级寿命和激活离子浓度等对激光器的本征效率有很大的影响. 提高 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的光学品质和激活离子的掺杂浓度, 优化泵浦源的运转波长和激光腔的设计都能显著改善 Cr⁴⁺ : YAG 固体激光器的本征效率.

关键词 激光技术, 固体激光器, Cr⁴⁺ : YAG 晶体, 本征效率

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

Cr⁴⁺ : YAG 激光器的泵浦吸收带为 900 ~ 1100 nm, 可以使用多种泵浦源, 其发射谱中心是 1400 nm, 输出波长在 1500 nm 附近^[1~6], 它属于光纤通信的低损耗区, 因此这种激光器可以作为量子通信系统、光纤通信系统中比较理想的光源. 激光器的效率和激光器工作的稳定性是激光器能够实用化的关键因素, 激光器谐振腔结构参量、Cr⁴⁺ : YAG 晶体参量、激光工作模式、泵浦源辐射光谱参量及工作方式等都会对固体 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的工作效率有着很大的影响. Cr⁴⁺ : YAG 激光器的效率可分为两类, 一类是与增益介质 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的本身特性参量有关的本征效率, 包括量子效率、吸收效率、储存效率和提取效率等; 第二类是与腔结构参量或泵浦源有关的可通过调节腔参量进行改变的非本征效率, 如电光转换效率、传输效率、与输出耦合镜的输出耦合率相关的输出效率等. 本文忽略非本征特性的效率, 只对 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的本征效率进行分析.

1 Cr⁴⁺ : YAG 激光器本征效率分析

1.1 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的吸收效率

Cr⁴⁺ : YAG 固体激光器的吸收效率是指被 Cr⁴⁺ : YAG 晶体吸收使处于基态上的粒子跃迁到高能级的那部分功率占整个泵浦光功率的比率, 可定义为

$$\eta_a = p_a / p_r \quad (1)$$

式中 p_a 是增益介质 Cr⁴⁺ : YAG 晶体整个的吸收

功率, p_r 代表激光器泵浦源辐射功率.

在固体 Cr⁴⁺ : YAG 激光器里, 一般可采用二极管泵浦, 也可采用 Nd 或 Yb 激光器泵浦, 这种泵浦方式采用的都是端面泵浦形式, 因此泵浦光的光谱分布可用高斯光谱分布来近似, 则泵浦光功率分布形式可表示为^[9]

$$p(\lambda) = (2.0 / \pi \Delta \lambda^2)^{1/2} \exp(-2.0(\lambda - \lambda_0)^2 / \Delta \lambda^2) \quad (2)$$

式中 λ_0 是泵浦光辐射谱中心波长, $\Delta \lambda$ 是辐射光谱的光谱宽度, λ 为辐射光波长. 泵浦光耦合到 Cr⁴⁺ : YAG 晶体时, 光谱辐射有一定的角分布, 其角分布函数假定为 $F(\theta)$, θ 是辐射角, 泵浦源整个泵浦光辐射功率的计算公式为

$$p_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} p(\lambda) F(\theta) \sin \theta d\theta d\lambda \quad (3)$$

式中 λ_1, λ_2 表示泵浦源辐射光谱波长的上下限, 而 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的吸收功率指晶体对辐射光吸收的多少, 它与泵浦源辐射光谱分布、Cr⁴⁺ : YAG 晶体的吸收系数和长度有关, 可表示为

$$p_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} p(\lambda) F(\theta) [1 - \exp(-\alpha l)] \sin \theta d\theta d\lambda \quad (4)$$

式中 α 是 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的吸收系数, l 表示晶体的长度. 要计算 p_a 就需先计算出吸收系数 α , 在 Cr⁴⁺ : YAG 激光器里, 晶体的吸收系数为

$$\alpha = n_0 \sigma_{gs} + n_1 \sigma_{es} \quad (5)$$

式中 n_0, n_1 分别表示粒子在基态、上能级激发态上的粒子数密度, σ_{gs}, σ_{es} 表示基态和上能级的吸收截面. Cr⁴⁺ : YAG 激光器属于三能级激光器系统, 在泵浦光辐射下, Cr⁴⁺ 粒子从基态跃迁到激发态, 粒子可以处在高能级和高能级两个激发态, 但是粒子在基态激发态的寿命很短, 会很快驰豫到上能级激发态. 忽略高能级激发态向基态的自发辐射跃迁和上能级向基态的自发辐射跃迁影响, 在泵浦光辐射

*国家自然科学基金项目(60378011)和北京市教委共建项目计划(XK100130437)资助

Tel: 023-58102309 Email: yuxian896@sohu.com

收稿日期: 2004-11-15

作用下 Cr^{3+} : YAG 激光器的速率方程组是

$$\begin{cases} \frac{dn_0}{dt} = -\frac{\sigma_{gs} I_p}{h\nu_p} n_0 + \frac{n_1}{\tau_1} + \frac{\sigma_a I}{h\nu} n_1 \\ \frac{dn_1}{dt} = \frac{\sigma_{gs} I_p}{h\nu_p} n_0 - \frac{\sigma_{es} I_p}{h\nu_p} n_1 + \frac{n_2}{\tau_2} - \frac{n_1}{\tau_1} - \frac{\sigma_a I}{h\nu} n_1 \\ \frac{dn_2}{dt} = \frac{\sigma_{es} I_p}{h\nu_p} n_1 - \frac{n_2}{\tau_2} \end{cases} \quad (6)$$

σ_a 表示上能级的辐射截面, ν_p 表示泵浦光辐射频率, I_p 表示泵浦光光强, τ_1, τ_2 分别表示上能级和高能级激发态上粒子的寿命, I 表示腔内激光脉冲的光强, ν 表示腔内激光脉冲频率, n_2 表示高能级激发态的粒子数密度, 而 $n = n_0 + n_1 + n_2$ 表示增益介质总的激活离子数密度, 它一般可通过测量得到.

在 Cr^{4+} : YAG 激光器稳定工作时可根据式(6)计算出 Cr^{4+} : YAG 晶体 Cr^{4+} 离子处于基态和上能级激发态上的粒子数密度 n_0 和 n_1 , 把计算结果代入式(5)就能计算出晶体的吸收系数 α , 再把计算出来的 α 代入式(4), 就可获得 Cr^{4+} : YAG 激光器的吸收功率 p_a , 把式(4)和(3)式代回式(1)就可计算出 Cr^{4+} : YAG 固体激光器的吸收效率, 即

$$\eta_a = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} p(\lambda) F(\theta) [1 - \exp(-\alpha l)] \sin \theta d\theta d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} p(\lambda) F(\theta) \sin \theta d\theta d\lambda} \quad (7)$$

分析式(7), Cr^{4+} : YAG 固体激光器的吸收效率与增益介质本身的特性、泵浦源的辐射谱和泵浦光辐射到激光介质上的角分布等有关. 取 Cr^{4+} : YAG 晶体的典型值, 粒子浓度取 $n = 10^{19}/\text{cm}^3$, 基态吸收截面 $\sigma_{gs} = 5.7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, 激发态吸收截面 $\sigma_{es} = 8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 发射截面 $\sigma_a = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 粒子在上能级寿命是 $3.4 \mu\text{s}$, 在高能级激发态的寿命是 $50 \text{ ps}^{[1]}$, 晶体长度取 20 mm , 把这些数据代入式(6)、式(5)和式(7), 可作出吸收效率与辐射波长的函数关系曲线如图 1.

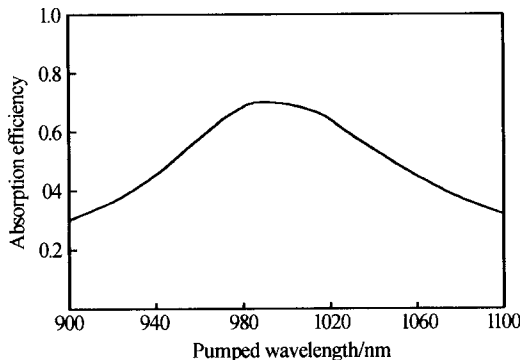


图 1 Cr^{4+} : YAG 激光器的吸收效率与泵浦波长的关系曲线

Fig. 1 The relation between absorption efficiency and pumped wavelength

据式(5), 吸收系数是粒子浓度的函数, 据式

(7), Cr^{4+} : YAG 激光器的吸收效率是晶体激活离子的浓度和增益介质的长度乘积的函数, 如取泵浦源辐射波长是 1064 nm , 其它参量来源于上面的值, 作出 Cr^{4+} : YAG 激光器吸收效率与晶体长度和激活粒子浓度乘积的关系曲线如图 2. 对图 2 分析知, 在粒子浓度和长度乘积比较小时, 吸收效率随其值增加快速增加, 但增加到一定值时, 效率就不会再提高了, 这是因为高的吸收效率会导致不均匀的增益分布. 这种情形下增益集中在激光介质的表面, 反过来影响光束质量, 影响到晶体对泵浦光的吸收. 这也表明在 Cr^{4+} : YAG 激光器里晶体长度和粒子浓度的乘积有一个最佳值, 在设计晶体结构参量时就是要寻找这个最佳值, 对激光介质的结构进行优化设计, 用最小的代价获得最大的效率.

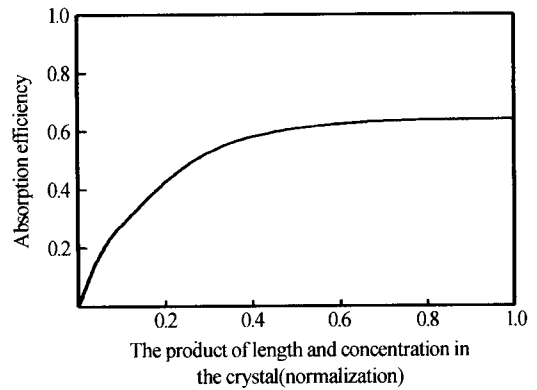


图 2 Cr^{4+} : YAG 激光器的吸收效率与晶体长度和离子浓度乘积的关系曲线

Fig. 2 The relation between absorption efficiency and the product of length and concentration

1.2 Cr^{4+} : YAG 激光器的储存效率

Cr^{4+} : YAG 激光器的储存效率是指增益介质吸收泵浦光子产生上能级或高能级激发态激活粒子的概率, 它定义为储存在上能级或高能级激发态上的有效功率和晶体吸收功率之间的比值

$$\eta_s = \frac{p_s}{p_a} \quad (8)$$

式中 p_s 为激光介质的有效功率, 也称储存功率, p_a 是激光介质的吸收功率如式(4), 储存在上能级和高能级激发态上的有效功率 p_s 与上能级反转粒子数密度有关, 与高能级激发态上的粒子数密度有关, 与泵浦光辐射频率有关, 可表示为

$$p_s = \hbar \omega_0 \int_A (dn_1/dt + dn_2/dt) dA \quad (9)$$

ω_0 是泵浦辐射光谱的角频率, A 是整个增益介质的体积, dn_1/dt 表示上能级的粒子数密度随时间的变化率, 而 dn_2/dt 是高能级激发态的粒子数密度随时间的变化率. 把式(9)和式(4)代入式(8)可得

$$\eta_s = \frac{\hbar \omega_0 \int_A (dn_1/dt + dn_2/dt) dA}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} p(\lambda) F(\theta) [1 - \exp(-\alpha l)] \sin \theta d\theta d\lambda} \quad (10)$$

在 Cr⁴⁺ : YAG 晶体中, 粒子在上能级的寿命比在 高能级激发态的寿命要长得多, 处在高能级激发态上的粒子会很快驰豫到上能级激发态, 因此可假定高能级激发态的 dn_2/dt 近似为 0, 对式(10)简化可得

$$\eta_s = \frac{hc}{\lambda_0} \frac{\int_A (dn_1/dt) dA}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda) F(\theta) [1 - \exp(-al)] \sin \theta d\theta d\lambda} \quad (11)$$

式中 c 光速, λ_0 辐射谱中心波长, h 普朗克常量.

根据式(11), 参考 Cr⁴⁺ : YAG 晶体的参量值, 作出储存效率与上能级反转粒子数密度和晶体长度的关系曲线, 如图 3 和图 4. 由图 3 知, 储存效率并非随上能级粒子密度线性增加, 储存效率存在一个上限值. 这是因为, 晶体吸收泵浦光子不一定产生上能级的激活粒子, 居于上能级的粒子也会通过无辐射跃迁衰减回到基态, 同时也由于增益饱和现象, 上能级的反转粒子数密度也不可能无限制地增加, 因此储存效率会有一个上限. 由图 4 知, 储存效率随晶体长度的增加先增加后下降的过程, 这是因为如果 l 太短, Cr⁴⁺ : YAG 晶体对泵浦辐射就不会有充足的吸收, 这样 Cr⁴⁺ : YAG 激光器有比较低的储存效率, 如果 l 太长, 虽有足够的吸收但却有部分增

益介质不能够泵浦, 因而不能达到达到粒子数反转的要求, 以至于 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的储存效率反而下降. 分析可知, 储存能量的上限依赖于增益介质的激活离子的掺杂浓度, 也与晶体的长度有关, 分析储存效率的目的就是要设计出晶体掺杂浓度的最佳和晶体长度的最佳.

1.3 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的提取效率

Cr⁴⁺ : YAG 激光器提取效率定义为储存在上能级能量与被提取用作激光振荡部分能量之比, 其定义式可写为

$$\eta_{ext} = p_0 / p_x \quad (12)$$

p_0 是腔内激光脉冲的激光功率, 它由上能级向基态跃迁的辐射功率组成, 由于只有高于激光器阈值功率的泵浦功率才能对腔内激光有贡献, 腔内激光功率的表达式可写成

$$p_0 = \frac{h\nu}{h\nu_0} \eta_q (\eta_a p_p - p_t) = \frac{\lambda_0}{\lambda} \eta_q (\eta_a p_p - p_t) \quad (13)$$

式中 ν, ν_0 和 λ, λ_0 分别是腔内振荡光和泵浦光的频率与波长, η_a 是吸收效率, η_q 是粒子从基态能级向上能级跃迁的概率, p_p 是泵浦光辐射到增益介质表面的泵浦功率, 它是式(3)的一部分, p_t 是激光器泵浦光的阈值功率. 忽略高能级激发态影响, p_x 可简化为 $p_x = \hbar \omega_0 \int_A (dn_1/dt) dA$, ω_0 表示泵浦光辐射角频率, 把它和式(13)代入式(12)可得

$$\eta_{ext} = \frac{p_0}{p_x} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\eta_q (\eta_a p_p - p_t)}{\hbar \omega_0 \int_A (dn_1/dt) dA} \quad (14)$$

根据式(14), 激光器的提取效率受泵浦光功率和泵浦光输入能量密度的影响, 与晶体本身性质有关, 受激光运转波长的影响等. 据式(14)以泵浦光功率为自变量作出提取效率与泵浦光功率关系曲线如图 5.

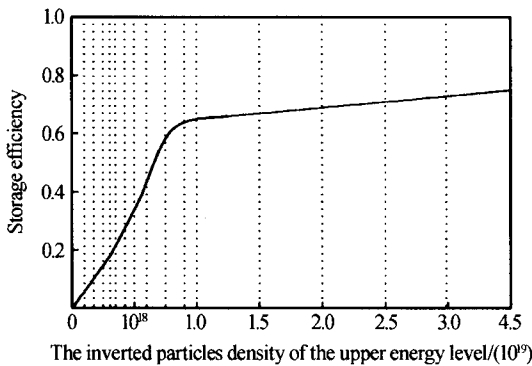


图 3 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的储存效率与晶体上能级粒子数密度的关系曲线

Fig. 3 The curve of storage efficiency with the upper energy inveted ion density

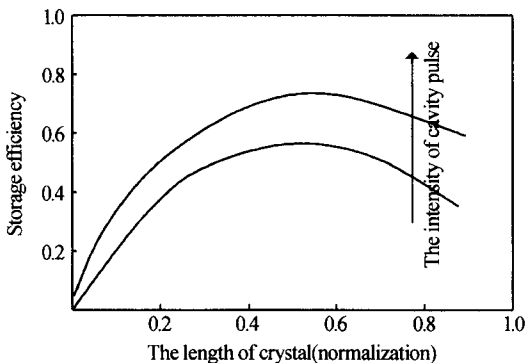


图 4 Cr⁴⁺ : YAG 激光器储存效率与晶体长度的关系曲线

Fig. 4 The relation between storage efficiency and the crystal length

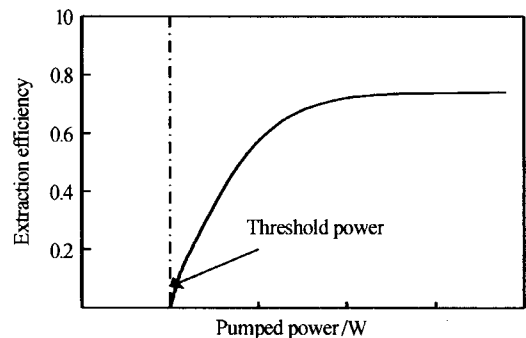


图 5 Cr⁴⁺ : YAG 激光器的提取效率与泵浦功率的关系曲线

Fig. 5 The relation between extraction efficiency and the pumped power

从图 5 可知, 低的泵浦输入功率不会有很高的提取效率, 如果提高泵浦功率, 这样会有高的提取效率, 有较大的输出能量, 但提取效率在增加到某一个

值时就不会再增加了。也就是说在这种激光器里,激光器的提取功率存在一个最大值,当达到这个最大值时,提取的能量就不再增加了。这是因为,在任何增益介质里提取能量受放大自发辐射噪声(ASE)和寄生振荡限制,ASE将减少有效的提取能量的总量,一般情况下增益越高,ASE效应就越明显,ASE依赖于介质的特性,依赖于腔的设计特别是纵横比和表面处理。选择合适的腔几何结构并优化设计激光谐振腔可以提高提取效率,因而可使激光器的总效率提高。

1.4 Cr⁴⁺:YAG 激光器的量子效率

Cr⁴⁺:YAG 激光器的量子效率定义为上能级所有粒子受激辐射跃迁到基态的辐射功率与增益介质吸收泵浦光子从基态跃迁到上能级或从上能级跃迁到高能级激发态所吸收的功率的比值,定义为

$$\eta_q = p_e / p_{\text{aef}} \quad (15)$$

p_e 是 Cr⁴⁺:YAG 晶体上能级上的粒子受激辐射跃迁到基态的辐射功率,其表达式可写为

$$p_e = \hbar \omega \int_A (dn_1/dt) dA \quad (16)$$

式中 ω 是粒子从上能级向基态跃迁的角频率, p_{aef} 为激光介质吸收泵浦光从基态跃迁到上能级和高能级激发态的总功率,其表达式可以表示为

$$p_a = \hbar \omega_0 \int_A (dn_1/dt + dn_2/dt) dA \quad (17)$$

ω_0 表示泵浦光辐射角频率,把式(17)和式(16)代入式(15),忽略高能级激发态的影响,Cr⁴⁺:YAG 激光器的量子效率可表示为

$$\eta_{\text{ext}} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (18)$$

由式(18)可知,Cr⁴⁺:YAG 激光器的量子效率在极限的情况下等于泵浦光波长与激光辐射波长的比值,如果使用波长是 1064 nm 的 Nd 激光器进行泵浦,Cr⁴⁺:YAG 激光器的激光波长假定为 1500 nm,则 Cr⁴⁺:YAG 激光器的最大量子效率为 71%,实际中的 Cr⁴⁺:YAG 激光器量子效率不可能达到这个值,比这个值要小。

2 讨论与结论

本文对 Cr⁴⁺:YAG 激光器的本征效率包括吸收效率、储存效率、提取效率和量子效率进行了定义和计算,量子效率决定了整个激光器最大能够达到的能量比值,它由所设计的激光器运转波长和泵浦源决定。而吸收效率表明了泵浦源辐射能量的利用率,泵浦光源的运转波长、光谱能量密度和辐射光的发射角对之都会存在影响、提高泵浦光的输出能量

密度、对泵浦光源的发射谱和增益介质的吸收谱进行匹配、采用纵向泵浦方式等都可以提高激光器的吸收效率。降低激光器的噪音、提高晶体粒子的掺杂浓度可以提高激光器的储存效率,优化激光腔的设计可以增加激光器的提取效率。

对于固体激光器,为了尽可能利用激活介质,一般情形下腔的设计要采用平行平面腔,这样其光束方向性好、模体积大、容易获得低阶模振荡,但其缺点就是要求对腔的调整准确度非常高并且腔中的损耗很大,Cr⁴⁺:YAG 晶体是一个三能级系统,其上能寿命比较低,大约是 3.4 μs ,它与平行平面腔建立稳定工作模式所需的渡越时间相比拟,因此在激光器建立稳定工作模式的过程中就会有大量的反转粒子数损耗,因此对于 Cr⁴⁺:YAG 激光器谐振腔一般采用稳定球面腔比平行腔更合适。

参考文献

- Hergen E, William M D, William M Y, *et al.* Performance of a Cr:YAG laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, **29**(9):2508~2512
- Alphan S, Clifford R P. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. *J Opt Soc Am B*, 1995, **12**(5):930~937
- 宋丽军,裴为华,宋晏蓉,等.自锁模 Cr⁴⁺:YAG 激光器的色散补偿研究. *光子学报*, 2003, **32**(10):1163~1165
Song L J, Pei W H, Song Y R, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1163~1165
- Alcock A, Sorach P, Hnatovsky K. Broadly tunable continuous-wave diode-pumped Cr⁴⁺:YAG laser. *Opt Comm*, 2003, **215**(1):153~157
- Leburn C G, Lagatsky A A, Brown C T A, *et al.* Femtosecond Cr⁴⁺:YAG laser with 4 GHz pulse repetition rate. *Electron Lett*, 2004, **40**(13):805~807
- Ripin D J, Chudoba C, Gopinath J T, *et al.* Generation of 20-fs-pulses by a prismless Cr⁴⁺:YAG laser. *Opt Lett*, 2002, **27**(1):61~63
- 郑权,赵岭,钱龙生,等. LD 泵浦 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器的低噪音运转. *光子学报*, 2003, **32**(11):1291~1293
Zheng Q, Zhao L, Qian L S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1291~1293
- 王石语,过振,傅君眉,等. LD 泵浦固体激光器基模振荡光的场分布噪音. *光子学报*, 2003, **32**(3):286~289
Wang S Y, Guo Z, Fu J M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3):286~289
- Sipes D L. Highly efficient neodymium:yttrium aluminum garnet laser end pumped by a semiconductor laser array. *Appl Phys Lett*, 1985, **47**(1):74~76

The Theoretic Analysis on the Efficiency in the Cr⁴⁺ : YAG Solid-state Laser

Yu Xianlun^{1,2}, Yang Bojun², Yu Li²

1 *Department of Electronics Engineering, the Chongqing Three Gorges University, Wanzhou in Chongqing 404000*

2 *Department of Physics, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876*

Received date: 2004-11-15

Abstract The efficiency of the solid-state laser is one of the key technology in practice. The intrinsic efficiency of the Cr⁴⁺ : YAG solid-state laser as the absorption efficiency, quantum efficiency, storage efficiency and extraction efficiency has been discussed in this paper. The absorption cross section, the stimulated emission cross section, the high energy level lifetime and the dopant ion concentration of the Cr⁴⁺ : YAG crystals would obviously affect the intrinsic efficiency of this laser. The efficiency of the Cr⁴⁺ : YAG solid-state laser will be largely improved when the optical quality and the dopant concentration in the Cr⁴⁺ : YAG crystals are increased and when the operated wavelength of pump and the design of the Cr⁴⁺ : YAG laser cavity is optimized.

Keywords Laser technique; Solid-state laser; Cr⁴⁺ : YAG crystals; Intrinsic efficiency



Yu Xianlun an associate professor, was born on Sep. 2, 1967, in Chongqi, China. He has been engaged in the research of the photoelectron device and the optical communication.