

文章编号: 0258-7025(2009)07-1735-05

LD 抽运 Nd : GdVO₄/LBO 腔内和频 491 nm 蓝光激光器

孟玉青^{1,2} 檀慧明¹ 付喜宏^{1,2} 崔铁成^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 为实现激光二极管(LD)抽运腔内和频 491 nm 蓝光激光器,从准三能级和四能级阈值和频理论出发,讨论和分析了1063 nm和912 nm激光双波长运转的条件。在实验中,采用标称输出功率为3 W的LD,端面抽运尺寸为3 mm×3 mm×2 mm,掺杂原子数分数为0.15%的Nd : GdVO₄晶体,利用线性直腔结构在腔内实现912 nm和1063 nm双波长同时振荡,并利用LBO晶体进行I类腔内和频,获得了连续0.8 mW 491 nm蓝色激光输出。

关键词 激光技术; 蓝光激光器; 准三能级; 四能级; 双波长; 和频

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1735

LD Pumped Nd : GdVO₄/LBO Intracavity Sum-Frequency 491 nm Blue Laser

Meng Yuqing^{1,2} Tan Huiming¹ Fu Xihong^{1,2} Cui Tiecheng^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract In order to obtain LD-pumped intracavity sum-frequency 491 nm blue laser, the oscillation conditions for the simultaneous dual-wavelength operation of 1063 nm and 912 nm were analyzed based on the threshold expressions of quasi-three-level and four-level system. In the experiment, a Nd : GdVO₄ laser crystal with doped concentration of 0.15% (atomic fraction) and size of 3 mm×3 mm×2 mm was pumped by a laser diode with the maximum output power of 3 W. A linear cavity setup was used to realize 912 nm and 1063 nm dual-wavelength operation. 0.8 mW 491 nm blue laser is obtained after a LBO crystal was inserted into the cavity as the sum frequency crystal.

Key words laser technique; blue laser; quasi-three-level; four-level; dual-wavelength; sum-frequency

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器因其结构紧凑、效率高、寿命长等优点,得到了广泛的应用。通过对激光二极管抽运的Nd³⁺离子激光器进行腔内倍频,已经获得了红、绿、蓝激光输出。近年来,为了进一步扩展全固态激光器输出的波长范围,研究人员开始将目光转向非线性和频技术。目前对于非

线性和频技术的研究大都集中在获得黄光和蓝光方面^[1~7],其中对于和频获得黄光的研究较多,技术也比较成熟,而对于和频获得蓝光的研究相对较少。对于掺Nd³⁺晶体,利用其1.06 μm与0.91 μm谱线经非线性和频技术可获得的蓝光接近于488 nm,而488 nm谱线在生物分析和荧光检测等领域有着特殊重要的应用。因而研究全固态腔内和频蓝光激

收稿日期: 2008-08-11; 收到修改稿日期: 2009-02-11

作者简介: 孟玉青(1981—),女,硕士研究生,主要从事全固态激光及光学频率变换技术等方面的研究。

E-mail: dameng0519@163.com

导师简介: 檀慧明(1954—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件技术等方面的研究。

E-mail: hmtan2223@yahoo.com.cn

光器有着很重要的实际意义。

在和频获得蓝色激光方面目前和频蓝光研究最多的就是 491 nm。2005 年,Emilie Herault 等^[8]利用大功率激光二极管阵列(LDA)抽运 Nd : GdVO₄ 晶体,获得了 30 mW 491 nm 蓝色激光,随后又利用大功率 LDA 抽运 Nd : GdVO₄ 晶体和 Nd : YVO₄ 晶体,获得了 303 mW 的 491 nm 蓝色激光。2008 年,Emilie Herault 等^[9]又利用 LDA 单支路抽运 Nd : GdVO₄ 晶体和 Nd : YVO₄ 晶体获得了 155 mW 的 491 nm 蓝色激光。国外的 491 nm 和频蓝光激光器大多是大功率 LDA 抽运单晶体或双晶体的实验报道,而在小功率 LD 抽运 491 nm 激光器方面却未见报道。本文所研究的是采用小功率 3 W LD 端面抽运 Nd : GdVO₄ 晶体,利用简单的线性直腔结构在腔内实现 1063 nm 和 912 nm 连续双波长运转,再利用 I 类相位匹配晶体 LBO 进行腔内和频,得到了 0.8 mW 491 nm 连续蓝色激光输出。

2 理论分析

2.1 Nd : GdVO₄ 晶体特性

Nd : GdVO₄ 晶体是一种性能优良的激光晶体^[10,11],它的谱线 912 nm 和 1063 nm 分别对应的是准三能级⁴F_{3/2}—⁴I_{9/2} 和四能级⁴F_{3/2}—⁴I_{11/2} 的跃迁,在准三能级与四能级之间实现腔内双波长振荡,目前已有的报道是激光二极管抽运 Nd : YAG 晶体腔内和频 500.8 nm 青光激光器^[12,13]。Nd : GdVO₄ 晶体与 Nd : YAG 晶体的光学特性对比如表 1 所示。

表 1 Nd : GdVO₄ 晶体与 Nd : YAG 晶体光学特性

Table 1 Optical properties of Nd : GdVO₄ and Nd : YAG crystals

	Nd : YAG	Nd : GdVO ₄
Laser wavelengths/nm	1064.2 946	1062.9 911.9
Emission cross section at ⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{11/2} /cm ²	2.8×10 ⁻¹⁹	7.6×10 ⁻¹⁹
Emission cross section at ⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{9/2} /cm ²	0.38×10 ⁻¹⁹	0.66×10 ⁻¹⁹
Ratio of lower level population to ⁴ I _{9/2} level population	0.0074	0.0573

从表 1 可以看出:1) Nd : YAG 晶体 1064 nm 和 946 nm 两条跃迁谱线的发射截面积之比为 7.37,而 Nd : GdVO₄ 晶体的 1063 nm 和 912 nm 谱线的有效发射截面积之比是 11.5,比值是 Nd : YAG 的 1.56 倍。由此可以看出利用 1063 nm

与 912 nm 两条谱线进行和频获得 491 nm 蓝光比利用 1064 nm 与 946 nm 和频获得 500.8 nm 青光的难度要大。2) Nd : YAG 晶体与 Nd : GdVO₄ 晶体相比,后者的荧光寿命要短于前者,且后者的下能级热粒子数占⁴I_{9/2} 能级总粒子数的比率高达 5.73%,远大于前者,这会产生非常严重的再吸收损耗,使得激光阈值很高,不易获得 912 nm 谱线的运转,这也使得利用 Nd : GdVO₄ 晶体获得 491 nm 激光输出更加困难。

虽然获得 491 nm 蓝光难度较大,但由于 491 nm 比 500.8 nm 更加接近 488 nm,它可有效取代传统体积庞大、转换效率低的氩离子激光器,应用前景非常广泛。且国内还没有开展这方面的研究工作,已有的相关报道大都来自于国外。因而研究 491 nm 全固态蓝光激光器有着深远的意义。

2.2 阈值理论

由于发射截面相差较大,要实现 912 nm 和 1063 nm 双波长运转,首先必须适当抑制 1063 nm 谱线的振荡。同时,由于 912 nm 跃迁属于准三能级跃迁,激光下能级的再吸收损耗与晶体长度关系非常密切,若晶体过长,再吸收损耗增大,会进一步提高激光振荡阈值、降低激光发射效率,因此为获得较高的振荡效率,必须选择合适的晶体长度。在这里选用长 2 mm,掺杂原子数分数为 0.15% 的 Nd : GdVO₄ 晶体^[14]。此外,912 nm 激光的下能级 Z₅ 是基态能级的一个 Stark 分裂,粒子数不为 0, Z₅ 子能级粒子数占基态总粒子数的 5.73%,因而要想实现粒子数反转,就必须有很强的抽运功率密度。实验中采用抽运光束直径为 100 μm 的 LD,通过减小抽运光的聚焦半径、提高抽运功率密度来克服准三能级阈值高的缺点。

由谐振腔处于稳态时的速率方程可导出准三能级和四能级阈值公式^[15,16]

$$P_{th3} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_l^2 + \omega_p^2) (L + T_3 + 2N_1^0 \sigma_3 l)}{4\sigma_3 \tau_f \eta_{p3} \eta_a (f_1 + f_2)}, \quad (1)$$

$$P_{th4} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_l^2 + \omega_p^2) (L + T_4)}{4\sigma_4 \tau_f \eta_{p4} \eta_a}, \quad (2)$$

其中 P_{th3} 为准三能级阈值, P_{th4} 为四能级阈值, τ_f 为增益介质上能级荧光寿命, σ₃ 为 912 nm 受激发射截面, σ₄ 为 1063 nm 受激发射截面, L 为腔内除透射损耗以外完成一次循环的总损耗, l 为激光晶体长度, T₃ 和 T₄ 为透射总损耗, f₁ 和 f₂ 分别为 912 nm 能级低能级和高能级上的粒子数分别占所在多重态上总粒子数的比例。N₁⁰ 为抽运光为零时,

低能级上粒子数密度, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l)$, η_p 为量子效率, α 为增益介质对抽运光的吸收系数, $h\nu_p$ 为抽运光的光子能量, ω_L 为介质内振荡光的光斑半径, ω_p 为介质内抽运光的光斑半径。

要抑制 1063 nm 谱线的运转, 就要增加输出镜对 1063 nm 的透过率, 令其阈值略高于 912 nm 激光谱线的阈值, 使得 912 nm 谱线先起振, 1063 nm 谱线后起振。现在估算实现双波长振荡时谐振腔对 1063 nm 透过率大致的范围。利用阈值公式令 $P_{th3} = P_{th4}$, 各参数具体如下: $f_1 = 0.0573$, $f_2 = 1.0$, $\eta_p = 1$, $\sigma_3 = 0.66 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_4 = 7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\omega_p = 50 \mu\text{m}$, 对于掺杂原子数分数为 0.15% 的晶体, $N_1^0 = 1.7376 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $l = 0.2 \text{ cm}$ 。对于本实验, 912 nm 谱线谐振腔的腔长为 16 mm, 1063 nm 谱线谐振腔的腔长为 18 mm, 由 ABCD 矩阵理论可知, 1063 nm 和 912 nm 两条谱线在激光晶体内的光斑半径分别为 $70.5 \mu\text{m}$ 和 $66.0 \mu\text{m}$, 将各数据代入(1)和(2)式中, 最后得

$$T_{1063} = 8.99L + 0.4682313. \quad (3)$$

估计和频晶体腔内往返损耗和工作物质内部损耗总和为 1%, 则得出在双波长同时起振的条件下, $T_{1063} = 55.3\%$ 。在实验中, Nd:GdVO₄ 晶体的端面镀膜对 1063 nm 的透过率大约为 86%, 因而分别选择对 1063 nm 透过率为 70% 和 60% 的输入镜作为 1063 nm 谐振腔的腔镜来进行实验对比分析。

3 实验装置与结果分析

3.1 实验装置

文献[12]的小功率青光和频激光器中, 实验装置是简单的直腔结构。晶体端面镀高反膜作为谐振腔的一个腔镜, 输出镜凹面镀一个波长的高反膜和另一个波长的部分反射膜作为另一个腔镜, 由于需通过腔镜镀膜来平衡两波长在腔内的净增益, 因而实现双波长运转的前提条件是对输出镜膜系进行非常严格的控制。和频青光两条谱线的受激发射面积相差不太大, 膜系较容易控制。但对和频 491 nm 蓝光来说, 和频的两条谱线受激发射面积相差较大, 膜系不太容易掌握。为避免复杂的膜系设计, 和频 491 nm 的实验装置采用线性双腔结构。先利用直腔结构获得准三能级 912 nm 谱线的振荡, 然后再采用直腔前面加一个对 1063 nm 有一定透过率的平面输入镜, 使得输入镜与准三能级输出镜构成四能级谱线的谐振腔, 通过适当选择 1063 nm 输入镜对 1063 nm 谱线的透过率实现腔内双波长同时运

转, 进而获得和频蓝光输出。具体的实验装置如图 1 所示。

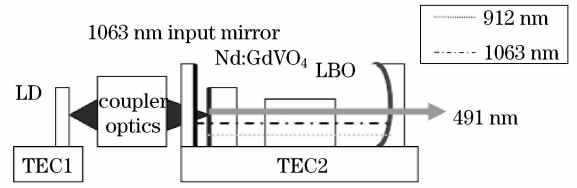


图 1 491 nm 蓝光激光器实验结构图

Fig. 1 Experimental setup of 491 nm blue laser

如图所示, 实验中采用标称输出功率为 3 W 的 LD, 通过制冷器 TEC1 的严格温控措施, 使其波长调节为 808.5 nm, 与 Nd:GdVO₄ 晶体的吸收峰重合。LD 发出的光经光学耦合系统后, 先经过一个对 1063 nm 部分透过的平面输入镜, 然后再聚焦到 Nd:GdVO₄ 晶体上, 聚焦半径为 $50 \mu\text{m}$ 。采用 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 0.15% 的 Nd:GdVO₄ 晶体, 晶体的左端面镀 912 nm 高反 1063 nm 部分透过膜, 右端面镀 912 nm 和 1063 nm 增透膜。采用曲率半径为 30 mm 的平凹镜作为共同输出镜, 输出镜内侧凹面镀的是 912 nm 和 1063 nm 高反膜。这样晶体左端面和输出镜凹面构成 912 nm 谐振腔, 1063 nm 输入镜的右端面和输出镜凹面构成 1063 nm 谐振腔。当谐振腔内 1063 nm 与 912 nm 两条谱线同时振荡后, 再放入尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 I 类相位和频晶体 LBO 置于腔内进行和频, LBO 两端均镀 912 nm, 1063 nm, 491 nm 增透膜。整个谐振腔置于制冷器 TEC2 上, 腔长约为 18 mm。

3.2 结果分析

首先选用对 1063 nm 透过率为 70% 的平面镜作为输入镜进行实验。由晶体左端面膜系对 1063 nm 透过率大约为 86% 可知整个谐振腔的 $T_{1063} = 60.2\%$, 此数据大于理论估算值 55.3%。实验结果是和频 491 nm 蓝光可以调出, 但功率较弱, 最大功率为 0.4 mW。然后再选用对 1063 nm 透过率为 60% 的平面镜作为输入镜进行对比实验, 经计算得 $T_{1063} = 51.6\%$, 低于理论估算值。从实验结果看和频 491 nm 蓝光也能够调出, 功率较前者稍大, 最大功率为 0.8 mW, 只是稳定性较差。初步估计稳定性差的原因是两条谱线在腔内进行竞争的结果, 因而又对 1063 nm 透过率为 50% 的平面镜进行实验, 结果发现此时 912 nm 的谱线已经完全被 1063 nm 谱线抑制掉了。此外为了验证理论计算值, 又选用了 1063 nm 透过率为 80% 的平面镜进

行实验,发现谐振腔内 1063 nm 谱线非常弱,和频蓝光的功率更低。由此得出前面的理论估算值可以作为参考数据,分别用 60%和 70%的平面输入镜进行实验,实验结果都不理想,这说明实验的最佳值有可能在 60%到 70%之间,而具体值大概是多少,则需用不同中间数值透过率的平面镜进行不断的实验,这将是下一步的工作内容。

选用对 1063 nm 透过率为 60%的平面镜进行实验的情况下,抽运功率为 0.8 W 时,蓝光 491 nm 开始出现,说明蓝光 491 nm 的阈值功率大约为 0.8 W。抽运功率到达 2 W 时,获得的 491 nm 最大功率为 0.8 mW。输出功率与抽运功率的对应曲线如图 2 所示。

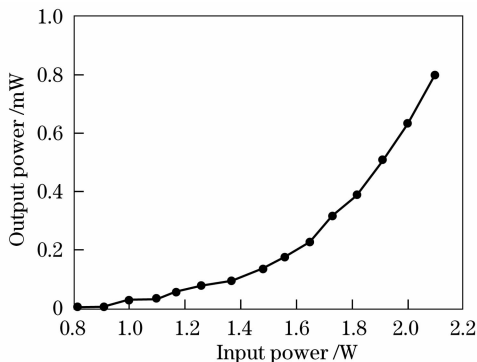


图 2 491 nm 输出功率随抽运功率的变化关系

Fig. 2 491 nm output power versus input pump power

从实验结果来看,蓝光 491 nm 的斜率效率很低,这可能是和频没有达到最佳状态造成的。而这也将是下一步要进行研究分析的问题之一。由于 491 nm 的输出功率较弱,现有的测量仪器无法测量其光束质量,图 3 所示为用数码相机拍摄的 491 nm 光斑照片。

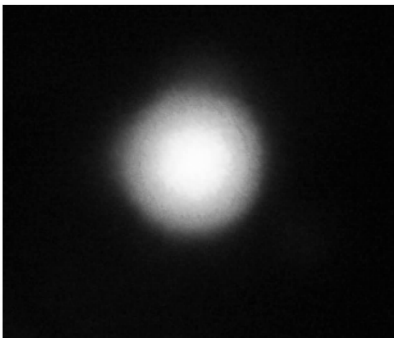


图 3 491 nm 光斑形状

Fig. 3 Light spot of 491 nm laser

4 结 论

从双波长激光运转及阈值理论出发,讨论和分

析了双波长运转的条件。实验装置采用线性双腔结构,避开了复杂的膜系设计,先实现 912 nm 谱线的振荡,然后再实现 1063 nm 谱线的振荡,最终实现和频 491 nm 蓝光输出。在实验中利用小功率 3 W LD 端面抽运掺杂原子数分数为 0.15%的 Nd : GdVO₄ 晶体,实现了 1063 nm 和 912 nm 谱线的双波长连续运转,并利用 I 类相位匹配晶体 LBO 实现了腔内和频,获得了连续蓝光输出。实验结果表明小功率 LD 抽运 Nd : GdVO₄ 晶体可实现 491 nm 蓝色激光输出,在和频蓝光固态激光器的发展方面前进了一步。目前该实验仍在进一步探索中,通过优化膜系有望进一步提高 491 nm 蓝色激光的输出功率。

参 考 文 献

- 1 Lü Yanfei, Tan Huiming, Miao Tongqun *et al.*. All-solid-state CW doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixing 593 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 729~733
吕彦飞,檀慧明,缪同群等. 全固态 593 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 729~733
- 2 Fu Xihong, Tan Huiming, Li Yimin *et al.*. All-solid-state single-longitudinal-mode 593.5 nm sum-frequency laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1469~1473
付喜宏,檀慧明,李义民等. 全固态单纵模 593.5 nm 和频激光器[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1469~1473
- 3 Zhang Juncheng, Wang Jiaxian, Su Peilin *et al.*. Theoretical and experimental study of LD pumped Nd : YVO₄ yellow laser with sum-frequency generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2365~2369
张峻诚,王加贤,苏培林等. 激光二极管抽运 Nd : YVO₄ 和频黄光激光器的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2365~2369
- 4 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency laser at 589 nm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3): 260~264
吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3): 260~264
- 5 Wang Jiaxian, Zhang Juncheng, Su Peilin. Investigation on a compound resonator Nd : YVO₄ laser with dual-wavelength output and intracavity sum-frequency mixing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 1954~1958
王加贤,张峻诚,苏培林. Nd : YVO₄ 复合腔激光器双波长激光输出及腔内和频研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12): 1954~1958
- 6 Liu Tianhong, Tan Huiming, Gao Lanlan *et al.*. Intracavity sum-frequency mixing with BIBO in 593 nm laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1195~1197
刘天红,檀慧明,高兰兰等. BIBO 腔内和频 593 nm 激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1195~1197
- 7 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Tan Huiming. 555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(5): 674~677
吕彦飞,张喜和,檀慧明. 全固态连续波 555 nm 黄-绿光激光器[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(5): 674~677
- 8 Emilie Herault, Francois Balembois, Patrick Georges *et al.*. 491 nm generation by sum-frequency mixing of diode pumped neodymium lasers[J]. *Optical Society of America*, 2005, **13**

- (15): 5653~5660
- 9 Emilie Heralut, Francois Balembos, Patrick Georges *et al.*. 1064 nm Nd : YVO₄ laser intracavity pumped at 912 nm and sum-frequency mixing for an emission at 491 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1632~1634
- 10 Nicolai Pavel, Yoichi Sato, Voicu Lupei *et al.*. Highly efficient laser operation of Nd-vanadates under direct pumping into the emitting level[C]. *SPIE*, 2004, **5581**: 135~142
- 11 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd : GdVO₄ laser with 840 mW output power at 456 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **20**(5): 361~365
- 12 QiYan, Bu Yikun, Zheng Quan. LD pumped intracavity sum-frequency CW 500.8 nm Nd : YAG/LBO laser[J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 436~438
元岩, 卜铁坤, 郑权. LD 抽运腔内和频连续 500.8 nm Nd : YAG/LBO 激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(6): 436~438
- 13 Bu Yikun, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. Design and manufacture of optical thin films for 500.8 nm Nd : YAG Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 79~83
卜铁坤, 郑权, 薛庆华等. 500.8 nm Nd : YAG 青光激光器光学薄膜的设计与制备[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 79~83
- 14 Li Yimin, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. Characteristics of intracavity-frequency-doubled Nd³⁺ : GdVO₄/LBO deep blue 456 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1308~1312
李义民, 檀慧明, 付喜宏等. 腔内倍频 Nd³⁺ : GdVO₄/LBO 深蓝 456 nm 激光器工作特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1308~1312
- 15 DuJianxin, Zhang Fengzhan, He Jingliang. Theoretical analysis of the operation at 946 nm of Nd : YAG longitudinally pumped with diode laser[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2003, **20**(4): 415~418
杜建新, 张风转, 何京良. 二极管端面抽运 Nd : YAG 946 nm 激光器理论分析[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(4): 415~418
- 16 W. P. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **5**(7): 1412~1423