

文章编号: 0258-7025(2005)08-1017-05

全固态 LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器

贾富强^{1,2}, 薛庆华^{1,2}, 郑 权¹, 卜轶坤^{1,2}, 谭成桥^{1,2}, 钱龙生¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 全固态黄光激光器大多采用掺 Nd³⁺ 激光晶体的 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ 能级跃迁和腔内和频技术来获得, 由于在输出光斑质量和功率稳定性方面一直存在较多困难, 所以寻找合适的基频光谱线同时利用腔内倍频是一种切实可行的解决方案。通过对 Nd YAG 激光谱线分析以后发现 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 这两个能级间部分激光谱线 (1112 nm, 1116 nm, 1123 nm) 经过倍频以后正好可以获得黄光激光输出。通过对 Nd YAG 各主要谱线激光参量比较和分析后发现, 要想获得增益较低激光谱线 1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 振荡, 可以通过镀制特殊要求的谐振腔膜抑制增益较大的 1064 nm, 1319 nm, 946 nm 激光谱线运转来实现。通过对谐振腔膜系的设计以及倍频晶体的合理选择和放置, 采用 LBO 晶体腔内倍频, 利用 2 W 的激光二极管(LD)抽运 Nd YAG, 获得了 556 nm 黄光激光输出, 在 1.6 W 的抽运功率下, 最大输出功率为 102 mW, 光-光转换效率为 6.4%。

关键词 激光技术; 激光二极管抽运固体激光器; 556 nm 黄光激光器; 腔内倍频; LBO 晶体

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

All-Solid-State 556-nm Yellow Laser by LBO Intracavity-Frequency-Doubling

JIA Fu-qiang^{1,2}, XUE Qing-hua^{1,2}, ZHENG Quan¹,
BU Yi-kun^{1,2}, TAN Cheng-qiao^{1,2}, QIAN Long-sheng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The generation of yellow laser mostly uses the laser transitions from $^4F_{3/2}$ to $^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2}$ to $^4I_{13/2}$ of Nd³⁺ doped crystal and adopts the technology of intracavity-frequency-mixing, but there are many difficulties for obtaining the high quality facula and high stable output power, thus the method of intracavity-frequency-doubling is proposed. The 1112-nm, 1116-nm, 1123-nm laser operations which have lower gain are obtained through suppressing the laser operations (at 1064 nm, 1319 nm, 946 nm) which have higher gain by film coated design of the cavity. Through the film coated designing and the frequency-doubling crystal selecting and aligning, the 556-nm yellow laser is obtained. The maximum output power is 102 mW, the light to light conversion efficiency is 6.4% when the incident pump power is 1.6 W.

Key words laser technique; LD-pumped solid-state laser; 556-nm yellow laser; intracavity-frequency-doubling; LBO crystal

1 引 言

对于 Nd YAG 激光晶体而言, 研究最多的是 1064 nm 激光谱线, 其次是 1319 nm 和 946 nm 激光谱线。通过对这三条谱线的基频激光进行倍频, 已经获得了绿光 (532 nm), 红光 (660 nm), 蓝光

(473 nm) 三基色激光光源^[1-3]。实际上, Nd YAG 的激光光谱中一共存在 30 多条谱线^[4], 除去激光性能相对较好的 1064 nm, 1319 nm, 946 nm 谱线以外, 1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 这三条激光谱线^[5]的性能也相对较好, 其中关于 1123 nm 激光谱线的

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-10-21

基金项目: 国家 863 计划(2002AA311141)资助项目。

作者简介: 贾富强(1980—), 男, 重庆大足人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 研究方向为全固态激光器件与非线性频率变换技术。E-mail: jfq555@yeah.net

报道较多,且多集中于该谱线的基频光运转^[6-8],目前关于 1112 nm 激光谱线的基频光和倍频光的输出还没有报道。1112 nm 经倍频获得的是 556 nm 的黄光,该波长非常接近人眼最敏感的波长 555 nm,适合于激光显示和照明。同时,黄光在分子生物学、化学等领域还有着重要的应用。到目前为止,黄光的获得多是采用腔内和频技术,这种基于双波长运转的腔内和频技术^[9,10]存在粒子数竞争、膜系设计困难等缺点,并且产生和频光的效率、光束质量和稳定性也不是很理想,如果能通过倍频的方式获得黄光输出,就可以克服这些缺点。本文通过对谐振腔镀制合适的激光膜,不仅在实验上获得了 1112 nm,1116 nm,1123 nm 这三条激光谱线的同时连续输出,而且通过 LBO 腔内倍频,利用 LBO 的角度调谐,已经获得了 556 nm 黄光输出,输出功率高达 102 mW。

2 理论分析

2.1 激光晶体

在 Nd:YAG 激光晶体中,钕离子(Nd^{3+})取代了 YAG 基质中的钇离子(Y^{3+}), Nd^{3+} 在晶格场的作用下,发生了斯塔克分裂,其能级结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出,1064 nm,1112 nm,1116 nm,

1123 nm 这四条谱线都是对应 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ 这两个能态之间的跃迁,只是其上下能级对应不同的斯塔克分裂子能级,其中 1064 nm 对应的是 R_2 到 Y_3 的跃迁,1112 nm 对应的是 R_2 到 Y_6 的跃迁,1116 nm 对应的是 R_1 到 Y_5 的跃迁,1123 nm 对应的是 R_1 到 Y_6 的跃迁。1112 nm,1116 nm,1123 nm 这三条激光谱线的相对性能比较接近^[4,5],三者中 1112 nm 谱线的受激辐射截面最大,也最易获得激光输出。1112 nm 与 Nd:YAG 常用谱线的激光特性比较^[4,5]如表 1 所示,其中 σ 表示受激发射截面, β 表示激光谱线的频宽, γ 表示荧光辐射相对强弱的分支比。

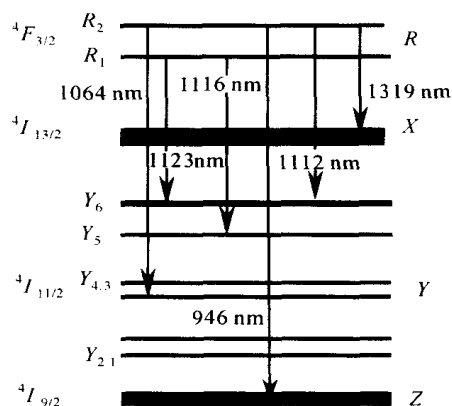


图 1 Nd:YAG 的能级图

Fig. 1 Energy level of Nd:YAG

表 1 Nd:YAG 中各主要谱线的激光特性比较

Table 1 Comparison of laser performances of the Nd:YAG at the main laser transitions

| λ / nm | Transition | σ / (10^{-20} cm^2) | β / cm^{-1} | (Branching ratios) | Relative performance |
|----------------|-------------|--|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 1064 | $R_2 - Y_3$ | 45.8 | 5 | 0.135 | 102 |
| 1112 | $R_2 - Y_6$ | 3.6 | 14 | 0.025 | 49 |
| 946 | $R_2 - Z_5$ | 5.1 | 9 | 0.040 | 46 |
| 1319 | $R_2 - X_1$ | 8.9 | 6 | 0.018 | 34 |

从表 1 可以看出,1112 nm 谱线的相对性能为 1064 nm 谱线的 1/2,受激发射截面约为 1064 nm 的 1/13,约是 1319 nm 的 2/5,是 946 nm 的 3/5,所以为了获得增益较小的 1112 nm,1116 nm,1123 nm 三条激光谱线的运转,不仅需要抑制 1064 nm 激光的振荡,同时还要对 1319 nm 和 946 nm 这两条谱线进行抑制,由于这三条谱线的增益系数较小,只有采用内部损耗较小的倍频晶体(倍频晶体的两端镀制增透膜)才能获得低阈值、高效率的激光输出。选择激光谱线的方法很多,如:腔内加入色散棱镜、镀制特殊要求的激光谐振腔薄膜等。这里通过提高谐振腔两腔镜对 1064 nm,1319 nm

和 946 nm 的整体透过率,抑制它们起振,同时提高谐振腔对 1112 nm,1116 nm,1123 nm 三条激光谱线的反射率,就可以获得这三种波长激光器的运转(通过镀制窄反射带激光膜,选择性地获得三者当中任意一条激光谱线的单独运转是非常困难的)。

2.2 倍频晶体

目前用于产生可见光的倍频晶体常用的有 KTP 和 LBO 两种,它们各有优点,其中 KTP 有效非线性系数大,LBO 走离角小,抗损伤阈值高。利用非线性光学软件,我们计算了这两种晶体对 1112 nm 激光倍频时的参量,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看到,KTP 的有效非线性系数较

表 2 KTP 和 LBO 倍频参量的比较

Table 2 Comparison of the frequency-doubling parameters of KTP and LBO

| Crystal | Type | Effective nonlinear optical coefficient / (pm/V) | Acceptance angle / (mrad · cm) | Acceptance bandwidth / (cm ⁻¹ · cm) | Walkoff / mrad |
|---------|--------------------------------|--|--------------------------------|--|----------------|
| KTP | 1112.0(o) + 1112.0(e) = 556(o) | - 3.72 | 2.57 | 8.84 | 34.74 |
| LBO | 1112.0(o) + 1112.0(o) = 556(e) | 0.836 | 13.72 | 98.15 | 5.05 |

大, 约是 LBO 的 4 倍, KTP 的走离角也较大, 约是 LBO 的 5 倍, 根据倍频晶体最大相互作用距离表达式

$$l_{\max} = 1.16w / \theta, \quad (1)$$

l_{\max} 为倍频晶体中基频光与倍频光的最大作用长度, w 为晶体中基频光光斑半径, θ 为倍频晶体中因双折射决定的走离角。当走离角过大时, 倍频晶体的长度选取受 l_{\max} 制约, 同时考虑到腔内倍频效率跟有效非线性系数和晶体长度乘积的平方成正比, 相比较 LBO 的效果会更好, 同时在接收带宽和接收角度上, KTP 还远不及 LBO 性能好, 所以从整体上考虑选择 LBO 作为倍频晶体。

3 实验装置与实验结果

实验装置如图 2 所示。激光二极管(LD)由中国科学院半导体所提供, 最大输出功率为 2 W, 中心发射波长为 807.5 nm。抽运光经耦合光学系统 CO 准直、扩束、聚焦以后光斑半径变为 102 μm 左右, 抽运光入射到 Nd:YAG 的左端面, Nd:YAG 的尺寸为 $\varnothing 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 掺杂原子数分数为 1.0%, Nd:YAG 左端面作为谐振腔的一个端镜, 其镀膜曲线如图 3 所示, 输出镜 OC 是曲率半径为 50 mm 的平凹镜, 其镀膜曲线如图 4 所示。如果靠谐振腔的某一端镜同时对 1064 nm, 1319 nm, 946 nm 高透, 并同时满足 1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 高反, 困难非常大, 这里把镀膜要求合理分配到谐振腔的两个端镜上, 只要满足谐振腔的总体要求即可。实验中对镀膜要求分配如图 3 和图 4 所示, 从图 3 看到, Nd:YAG 的左端面只对 946 nm 和 1319 nm 高透, 对 1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 高反。从图 4 可以看出, 输出镜对 1064 nm, 556 nm 同时高透, 对

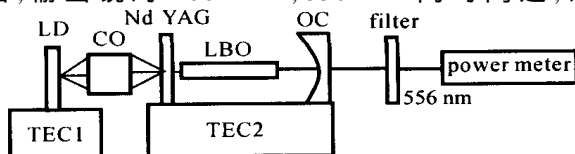


图 2 556 nm Nd:YAG/LBO 激光器实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of 556 nm Nd:YAG/LBO laser

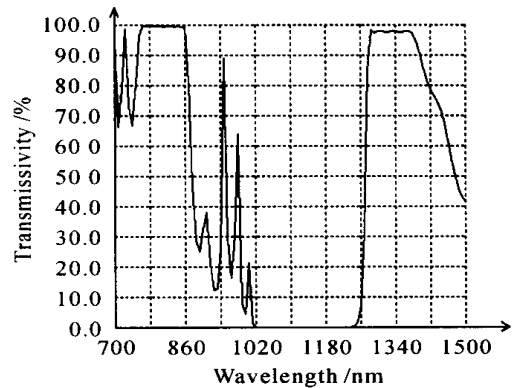


图 3 Nd:YAG 左端面透过率曲线

Fig. 3 Transmissivity of the left side of Nd:YAG

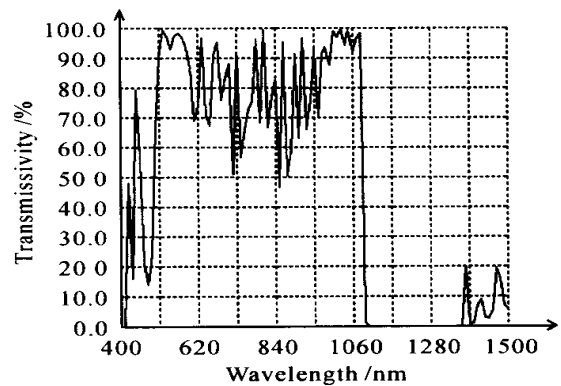


图 4 输出镜的透过率曲线

Fig. 4 Transmissivity of output coupler

1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 高反, 整体考虑谐振腔对各谱线的透过率情况以后, 增益较大的谱线 (1064 nm, 1319 nm, 946 nm) 被抑制掉, 增益较小的谱线 (1112 nm, 1116 nm, 1123 nm) 已经可以起振, 实验结果表明膜系的设计非常合理。谐振腔由工作物质的左端面和输出镜共同构成, 谐振腔的长度约为 24 mm。TEC1 和 TEC2 分别是激光二极管和激光晶体的温度控制器, Filter 是滤基频光的滤光片, Power Meter 是相干公司的 Field Master-GS 功率计。

实验时首先调节 TEC1 的温度, 让激光二极管的发射峰与 Nd:YAG 的吸收峰 808.5 nm 重合 (激光二极管的发射波长随温度变化大约为

0.3 nm/) ,然后仔细调节输出镜的位置和 TEC2 温度,直到红外输出光斑和功率达到最佳状态。实验中,一定抽运功率下获得激光输出以后,在调节谐振腔的位置到最佳的过程中发现,当输出激光接近最佳状态的时候,Nd YAG 晶体产生的荧光开始呈蓝色,蓝色荧光的产生为激发态吸收所致,同时还曾发现在腔内没有倍频晶体的时候,在倍频光输出镜的右端有微弱的绿光斑点,产生原因目前还不清楚。在最佳状态时通过光谱仪测量输出激光的光谱,如图 5 所示。从图 5 可见输出激光光谱中存在三个明显的尖峰,它们正好对应 1112 nm, 1116 nm, 1123 nm 这三条激光谱线(由于三条激光谱线的相对性能和受激发射截面比较接近,在特定的抽运功率下它们很容易同时获得激光输出)。

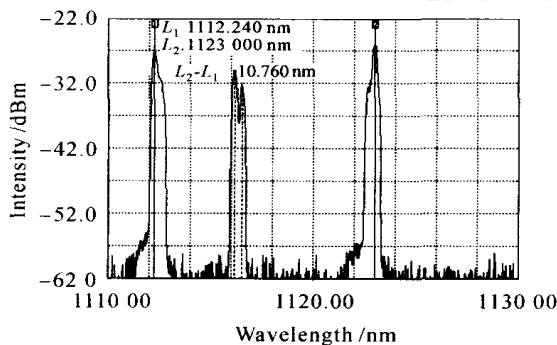


图 5 基频光的光谱图

Fig. 5 Spectrum of the fundamental wave

在成功获得这三条谱线同时运转以后,在谐振腔内插入按 1112 nm 类临界相位匹配切割的 LBO ($\theta = 90^\circ, \phi = 8.3^\circ$), LBO 的尺寸为 2 mm \times 2 mm \times 10 mm,两端都镀制基频光和倍频光的减反射膜,以降低 LBO 的插入损耗。在调整 LBO 角度过程中发现,对于不同的 LBO 放置角度就会有不同波长的倍频光(556 nm, 558 nm, 561 nm) 输出。虽然在腔内没有放入倍频晶体的时候,输出基频激光中存在三种波长(1112 nm, 1116 nm, 1123 nm),在调整 LBO 放置角度过程中,三种倍频光会交替出现,但当调整 LBO 的角度到某一个特殊位置后,却只有其中一种倍频光产生,这归因于 LBO 的接收角比较小(在 1112 nm 处为 13.72 mrad \cdot cm,在 1116 nm 处为 14.21 mrad \cdot cm,在 1123 nm 处为 15.15 mrad \cdot cm),同时在 1112 nm ($\theta = 90^\circ, \phi = 8.3^\circ$), 1116 nm ($\theta = 90^\circ, \phi = 8.0^\circ$), 1123 nm ($\theta = 90^\circ, \phi = 7.5^\circ$) 处的相位匹配角度又有较大的差别,通过简单的理论计算,当 LBO 按照准确 1112 nm

的相位匹配角度放置时,对于跟 1112 nm 同光轴的 1116 nm 和 1123 nm 激光束而言,此时的放置角度跟 1116 nm 和 1123 nm 的相位匹配角度相差一定大小,对于 1116 nm, $\theta_{1116} = 0^\circ, \phi_{1116} = 0.3^\circ$;通过换算在 ϕ 方向上匹配角度差为 52 mrad \cdot cm,大于 1116 nm 处的接收角 14.21 mrad \cdot cm;对于 1123 nm, $\theta_{1123} = 0^\circ, \phi_{1123} = 0.8^\circ$;通过换算在 ϕ 方向上匹配角度差为 140 mrad \cdot cm,大于 1123 nm 处的接收角 15.15 mrad \cdot cm,此时 LBO 的放置角度只满足某一波长(1112 nm)的相位匹配条件,所以只能对该波长有倍频作用而不能满足 1116 nm 和 1123 nm 的相位匹配条件,倍频光的波长中也就只有 556 nm 存在,当 LBO 的放置角度与 1112 nm 相位匹配角度相差稍大时,LBO 就可能对三个基频光都产生倍频输出。实验中发现在调整 LBO 的过程中,556 nm 的输出功率最高,同时还最容易获得(这与这三条谱线的激光性能比较接近,而 1112 nm 谱线的受激发射截面最大是吻合的),在仔细调整 LBO 的角度到输出功率最高,输出波长唯一时把 LBO 固定,用 LABRAM-UV 紫外优化微区拉曼光谱仪(法国 JY 公司生产)对倍频光进行扫描,发现倍频光谱中只存在 556 nm 这一波长,用 Origin 软件对光谱数据进行处理以后的光谱如图 6 所示(通过改变 LBO 的角度,已经通过肉眼观察到倍频光颜色的交替变化,测量光谱时样机中 LBO 的角度已经固定,此时对应的倍频光中只含有 556 nm 波长的激光输出,所以不能给出输出光中含有 558 nm 或者 561 nm 倍频光的光谱图)。利用相干公司的 Field Master-GS 功率计测量了倍频光的输出功率随抽运功率的变化曲线,如图 7 所示,由于 556 nm 倍频光的输出对基频光之间(1112 nm, 1116 nm, 1123 nm)的竞争影响很大,导致 556 nm 倍频光的输出功率不稳定,图 7 中给出的是多次测量的平均

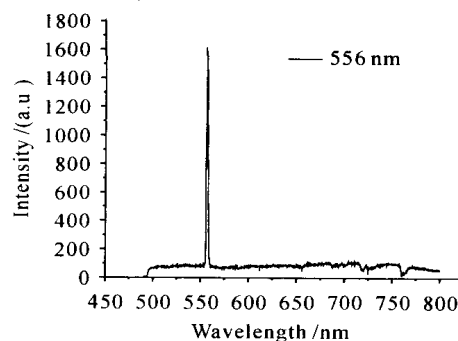


图 6 倍频光的输出光谱图

Fig. 6 Spectrum of the double-frequency wave

值。输出功率不稳定可以定性地解释为谐振腔内同时存在三条基频光谱线,当腔内插入 LBO 以后, LBO 只对其中一条基频光(例如 1112 nm)倍频时,倍频光的输出可以折合为 1112 nm 激光的输出损耗,1112 nm 激光损耗的增加导致另外两条基频光(1116 nm,1123 nm)的净增益相对变大,腔内功率增加,相互竞争的结果使 1112 nm 激光的腔内功率变小,倍频光 556 nm 的输出降低,相应基频光 1112 nm 的损耗降低,1112 nm 基频光的净增益增强,倍频光输出功率开始增加,直到(1116 nm,1123 nm)激光的净增益较 1112 nm 激光大时,倍频光的功率又开始降低,就这样周而复始地波动下去。利用数码相机对倍频光的光斑拍照,如图 8 所示。

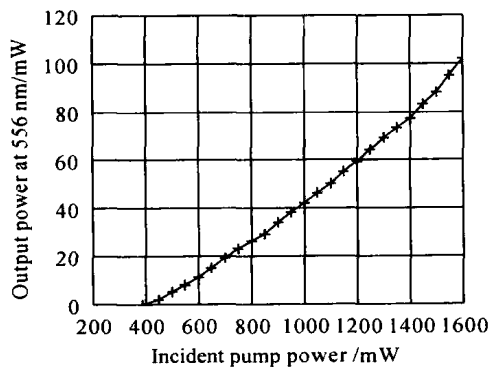


图 7 黄光的输出功率随输入功率的变化曲线

Fig. 7 Output power at the 556 nm versus the incident pump power

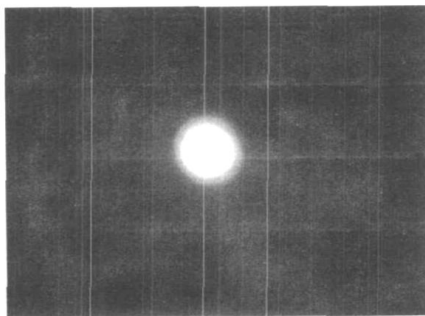


图 8 倍频光光斑

Fig. 8 light spot of the double-frequency wave

4 结 论

为提高全固态黄光激光器的光束质量和功率稳定性,可以通过选择合适的基频激光运转谱线(1112 nm,1116 nm,1123 nm),利用腔内倍频技术来实现。通过对 Nd YAG 各主要谱线的激光参量

的比较和分析以后,发现要想获得低增益谱线 1112 nm,1116 nm,1123 nm 振荡,必须通过镀制特定的谐振腔膜来抑制增益较大的 1064 nm,1319 nm,946 nm 谱线的运转。通过对谐振腔膜系的设计以及对倍频晶体的合理选择,利用 2 W 的激光二极管抽运 Nd YAG,采用 LBO 晶体腔内倍频,通过 LBO 角度的合理调节,在 1.6 W 的抽运功率下,获得了 102 mW 的 556 nm 黄光输出。如果进一步优化膜系的设计以及晶体的选取,采用 2 W 激光二极管抽运时有望获得大于 150 mW 的黄光输出。进一步的工作将使用 20 W 的激光二极管阵列(LDA)作为抽运源,获得大功率黄光激光器,充分满足激光显示和表演需要。

参 考 文 献

- Feng Yan, Bi Yong, Zhang Hongbo *et al.*. 20 W Nd YAG all-solid-state green laser by extracavity-frequency-doubling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):469~471
冯衍,毕勇,张鸿博等. 20 W 腔外倍频全固态 Nd YAG 绿光激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):469~471
- Zheng Quan, Xue Qinghua, Wang Junying. Diode-pumped Nd YAG/LBO red laser output up to 1.2 W [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(1):24~26
郑权,薛庆华,王军营. LD 抽运 1.2 W 连续 Nd YAG/LBO 红光激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(1):24~26
- Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*. Cr YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):673~676
郑权,赵岭,邵永红等. Cr YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):673~676
- S. Singh, R. G. Smith, L. G. Van Uitert. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, **10**(6):2566~2572
- W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 45
W. 克希耐尔 著. *固体激光工程* [M]. 北京:科学出版社, 2002. 45
- Y. F. Chen, Y. P. Lan, S. W. Tsai. High-power diode-pumped actively Q-switched Nd YAG laser at 1123 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**:309~313
- Y. F. Chen, Y. P. Lan. Diode-pumped passively Q-switched Nd YAG laser at 1123 nm [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**:29~31
- Xiaoping Guo, Meng Chen, Gang Li *et al.*. Diode-pumped 1123-nm Nd YAG laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7):402~404
- Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang *et al.*. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd YVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(20):1809~1811
- Shen Hongyuan. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1990, **7**(4):174~176
沈鸿元. 多波长激光器同时运转条件[J]. *中国物理快报*, 1990, **7**(4):174~176