

掺钕钨酸钪钾激光晶体生长及性能研究

王宇明^{1,2}, 张礼杰², 李建利², 雷鸣², 王英伟², 刘景和²

(1. 长春工业大学化工学院, 吉林 长春 130012)

(2. 长春理工大学材料与化工学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 采用顶部籽晶提拉法(TSSG)生长出Nd³⁺:KGd(WO₄)₂晶体, 测得Nd³⁺实际掺杂浓度3.2 at%。测得样品的吸收光谱及荧光光谱, 计算得出808 nm处吸收截面为0.6799×10⁻²⁰ cm²; 荧光输出波长为1068 nm和1351 nm, 测得荧光寿命为112 μs。对不同尺寸的两样品进行了激光实验, 当LD泵浦源输出功率为900 mW时, 分别获得326 mW, 305 mW的1064 nm激光输出, 斜效率分别为62.7%和57.8%。水平和垂直两个方向上光束传输因子M²均小于1.2。经倍频获得532 nm的绿光。用Cr:LuAG作为可饱和吸收体进行调Q实验, 重复频率为15 kHz时, 脉冲宽为170 ns。

关键词: Nd:KGW晶体; TSSG法; 光谱性能; 激光性能

中图分类号: O78

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2006)10-1531-04

二极管泵浦固体激光器在很多领域都有广泛的应用, 随着人们对它不断深入的研究, 发现了许多良好的工作物质, 最常见的有: 掺Nd³⁺的YAG, YVO₄, YLF以及近10年来研究的掺Nd³⁺或Yb³⁺的KY(WO₄)₂(KYW)和KGd(WO₄)₂(KGW)^[1]等。与目前应用最广的Nd:YAG相比, Nd:KGW晶体具有更多的优异性能, 如: 在输出波长1064 nm和1351 nm处发射截面积大, Nd³⁺的高掺杂而不会引起浓度淬灭(最高可达10 at%), 有宽的吸收和发射带, 可以增强二极管泵浦的波长稳定性, 同时大的发射带宽有利于产生超短脉冲^[2]。Nd:KGW的另一独一无二的性质是它能产生自激励拉曼散射, 产生0.94 μm的反斯托克斯散射, 1.18 μm的一阶斯托克斯和1.32 μm的二阶斯托克斯散射, 经倍频成为可见光波段的多波长光源^[3]。

用传统的方法很难得到高质量的Nd:KGW晶体, 由于该晶体3个晶向上的热传导系数和热膨胀系数的不同, 导致晶体中产生较大的应力, 最终会导致晶体破裂^[4]。本实验采用TSSG法生长Nd:KGW晶体, 并对其光谱和激光性能进行了研究。

1 实验

1.1 晶体生长

按照分子式Nd_xKGd_{1-x}(WO₄)₂(x=0.05)的化学计量比配料500 g, 以K₂W₂O₇为助熔剂, 采用TSSG法生长Nd:KGW晶体。引晶温度约880℃~890℃, 降温速

率0.05℃/h~0.1℃/h, 转速10 r/min~20 r/min, 拉速1 mm/d~2 mm/d, 生长周期为10 d~15 d。最终得晶体形状规则, 且无明显的包裹物和裂纹。如图1所示。

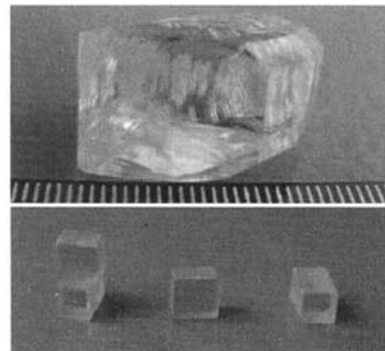


图1 Nd:KGW晶体

Fig.1 Nd:KGW crystal

1.2 Nd:KGW晶体光谱测试

晶体切片抛光后, 在室温下用日本岛津UV360型分光光度计测定了该晶体在300 nm~878 nm波长范围的吸收光谱。用PL9000型光致发光荧光光谱仪(激发波长为488 nm的Ar⁺激光器)对晶体进行荧光光谱测试。

1.3 激光实验

本次实验的样品尺寸: 5 mm×5 mm×2 mm(记

收稿日期: 2005-08-25

基金项目: 总装预研项目(41312040801)

作者简介: 王宇明, 女, 1972年生, 博士生, 长春工业大学化工学院, 吉林 长春 130012, E-mail: sny2003@sina.com.cn

为 1[#]), $\phi 2.6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ (记为 2[#]), 通光方向分别为 2 mm 和 4 mm, 两端面抛光, 平面度 < 1 个光圈, 平行度 < 10", 未镀膜。

谐振腔结构为线性平凹腔, 如图 2 所示。泵浦源为额定输出功率 1 W 的光电二极管。在操作温度为 25℃ 时, 二极管发射的激光中心频率为 808 nm, 发射带宽小于 3 nm, 总效率为 27%。它的温度是由冷却装置(Neolab-CFT-33)控制的, 二极管发射的激光经光学耦合装置聚焦后成为椭圆度 0.88 束腰半径约 100 μm 的高质量泵浦光射在晶体表面。透镜焦距 f 为 36 mm, 输出耦合镜镀 1064 nm 增反膜, 对于波长为 1064 nm 的光反射率 $R_{\text{out}}=90\%$, 其曲率半径为 50 mm。反射镜对 808 nm 透过率 $T>80\%$, 而对于 1064 nm 全反射。腔长 20 mm。

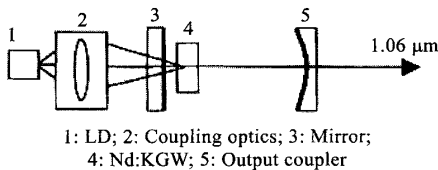


图 2 LD 泵浦 Nd:KGW 激光器结构

Fig.2 Structure of Nd:KGW laser by LD pumped

当激光器连续工作时, 输出能量用 RJ-7610 型能量计测量。在调 Q 操作时, 用 Cr:LuAG 作为可饱和吸收体, 放入腔内, 厚度 0.60 mm, 表面抛光, 未镀膜。实验用响应小于 1 μs 的光电探测器和响应带宽 100 MHz 数字示波器进行波形探测。

2 结果与讨论

2.1 助熔剂 K_2WO_4 与 $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 的比较

生长 Nd:KGW 晶体常用的助熔剂是 K_2WO_4 和 $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 。 $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 对 KGW 有足够大的溶解度, 大致在 10 at%~50 at% 之间, 可供选择的生长温度范围比较宽, 有 125℃。在比较大的温度等条件范围内, $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 和熔质的作用是可逆的, 所要的晶体是唯一稳定的物相。在价态以及阴阳离子半径等方面, $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 与 KGW 晶体有相似之处。另外, 从酸碱性来看 $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$, $\text{KNd}(\text{WO}_4)_2$ 和 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 碱性逐渐减弱, 助熔剂和 $\text{KNd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 三者之间的酸碱度水平较为接近, 熔质与熔剂之间比较容易形成共溶。 $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 熔点较低(619℃), 作为助熔剂, 可以有效降低整个熔体的熔解温度。特别有利的是, $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 与 KGW 晶体的 W, O 等的价态相同, 阴阳离子半径相近, 而且是与晶体具有相同原子的助溶剂。因此, 本实验选择

$\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ 为助熔剂。

2.2 吸收光谱

室温下测得晶体的吸收光谱, 如图 3 所示, 在 300 nm 到 878 nm 之间一共有 6 组较强的吸收带, 并且在 808 nm 处附近有很宽的吸收带, 约为 3.5 nm 到 4.5 nm 之间。对应于 $\text{Nd}^{3+}(^4\text{I}_{9/2}-^4\text{F}_{7/2})$ 跃迁, 这与本次激光实验 LD 发射的波长相匹配, 有利于提高 LD 抽运效率。根据公式 (1) [5] 计算出 808 nm 处的峰值吸收截面积为 $\sigma=0.6799 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。

$$\sigma(\nu) = \ln [I_0(\nu)/I(\nu)] / NL = 2.3D/NL \quad (1)$$

式中: N 为 Nd 离子的浓度 (Nd^{3+} 离子数/ cm^3), 用电子探针方法测得 Nd^{3+} 浓度为 3.2 at% ($2.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$); L 为样品的厚度 (cm); D 为光密度; $I_0(\nu)$ 为入射光的强度; $I(\nu)$ 为透射光的强度。

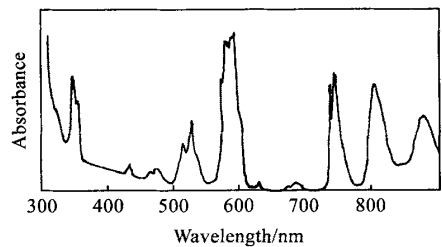


图 3 Nd:KGW 晶体的吸收光谱

Fig.3 Absorption spectrum of the Nd:KGW crystal

2.3 荧光光谱

晶体的荧光光谱如图 4 所示。晶体在波数为 7396.8 cm^{-1} 和 9357 cm^{-1} 两个位置有明显的发射峰, 对应的发射波长分别为 1351 nm 和 1068 nm, 分别对应于 Nd^{3+} 的 $^4\text{F}_{3/2}-^4\text{I}_{13/2}$ 和 $^4\text{F}_{3/2}-^4\text{I}_{11/2}$ 的跃迁。实验测得荧光寿命为 112 μs 。

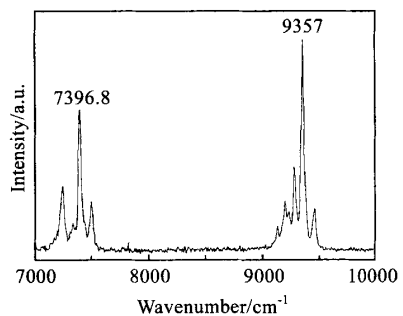


图 4 Nd:KGW 晶体荧光光谱

Fig.4 Emission spectra of Nd:KGW

2.4 激光的连续输出

对于 1#样品，通过测试发现 Nd:KGW 有明显的偏振吸收特性，通光长度为 2 mm 的 Nd:KGW 对偏振泵浦光的吸收，两个方向分别是 79%和 68%，当泵浦光波长改变时，吸收率变化不大，这说明 Nd:KGW 在 808 nm 附近的吸收带较宽。

泵浦功率为 900 mW 时（输出耦合镜反射率 $R_{out}=90%$ ），输出 326 mW 的 1.064 μm 的激光，激光外推阈值为 380 mW，光-光转换效率 36.2%，斜效率 62.7%。输入输出曲线如图 5a 所示。激光输出为 TEM₀₀ 模，水平和垂直两个方向光束传输因子 M^2 均小于 1.2，接近于衍射极限 ($M^2=1$)。本实验所输出的激光为线偏振光，用格兰棱镜测量，测得偏振比大于 1000:1。作者对 Nd:KGW 晶体做了倍频实验，将 Nd:KGW 晶体放入 KTP 腔内倍频，获得 32 mW 的波长为 0.53 μm 的绿光，说明该晶体不但可以产生 1.06 μm 的基频光，也适用于 0.53 μm 倍频光的产生。

对于尺寸为 $\phi 2.6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的 2#样品，在以上条件不变的情况下，泵浦功率为 900 mW 时，输出 305 mW 的 1.06 μm 激光，外推阈值为 390 mW，光-光转换效率为 33.8%，斜率效率为 57.8%。输入输出功率关系如图 5b。相比 1#样品，2#样品的激光输出斜率偏低，阈值也稍高。因为是按同一方向切割的两样品，不存在由于通光晶向不同造成的效率差异。分析认为由于晶体通光方向较长造成晶体内热损耗增加造成 2#样品

的效率降低。因此，Nd:KGW 激光器的冷却系统尤为重要，这也是以后的工作重点。

2.5 调 Q 输出

用 $\text{Cr}^{4+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{Cr}:\text{LuAG})$ 作为可饱和吸收体，对 1#样品进行调 Q 实验。它具有良好的性能，如：在 1060 nm 处具有低的激发态吸收截面积；Cr:LuAG 还起一个软边光阑的作用，保证单横模工作，并有助于抑制其它纵模振荡，实现单纵模振荡。当重复频率为 15 kHz，泵浦功率为 1 W 时，获得脉冲宽约为 170 ns，平均输出 20 mW 的激光。显然，激光转换效率很低，可能与可饱和吸收体或者 Nd:KGW 晶体的光学质量有关，也可能是因为热载荷对晶体的影响造成的。通过对损耗的估算，能反映出热负荷对 Nd:KGW 晶体造成的破坏程度。

根据 Findlay-Clay 法则^[6]：

$$-\ln R_{out} = 2KE_{th} - L \tag{4}$$

式中： R_{out} 为输出耦合镜的反射率； K 为抽运系数； E_{th} 为阈值能量； L 为腔内总的光学损耗。其中 $L=2\delta l+L_M$ ， l 为晶体长度， δ 为单位长度的损耗； L_M 为其它损耗，如后反射镜的吸收和散射损耗以及谐振腔的衍射损耗等。经估算 L_M 值约为：1%~4%。根据方程 (4)，可以通过测得不同 R_{out} 下的阈值 E_{th} ，从而得到 $-\ln R_{out}$ 与 E_{th} 的直线关系，估算出腔内总损耗 L 的值。经粗略估算约为 0.23。

3 结 论

1) Nd:KGW 晶体在 808 nm 附近有很宽的吸收带，与 LD 泵浦源能够很好的匹配，其峰值吸收截面积为 $0.6799 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ；

2) 荧光光谱在 1.068 μm 和 1.351 μm 有两个发射峰，荧光寿命为 112 μs 。

3) Nd:KGW 的激光性能方面，光-光转换效率为 36.2%，斜效率 62.7%，水平和垂直方向的光束传输因子 M^2 均小于 1.2，其输出波长为 1.064 μm 。

4) Nd:KGW 激光器的冷却系统对最后的输出效率有重要的影响。用 KTP 腔内倍频获得 32 mW 的 0.53 μm 绿光。

5) 重复频率为 15 kHz 时，脉冲宽为 170 ns。

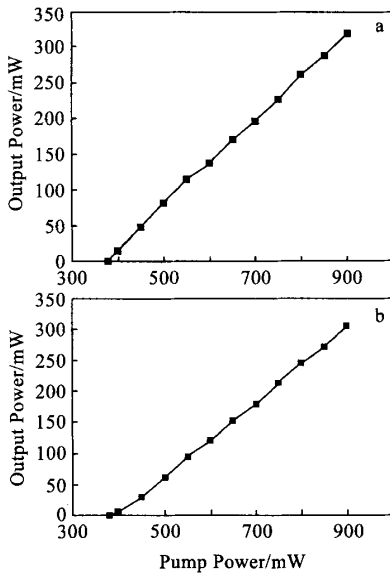


图 5 Nd:KGW 激光器输入输出功率关系曲线

Fig.5 Input-output data for CW diode pumped Nd:KGW:

(a) Nd:KGW: 5 mm x 5 mm x 2 mm
and (b) Nd:KGW: $\phi 2.6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$

参考文献 References

[1] Boulon G, Metrat G, Muhlstein N et al. *Optical Materials*[J], 2003, 24: 377
 [2] Turi L, Juhasz T. *Opt Lett*[J], 1995, 20: 1541
 [3] Mao Yanli(毛艳丽), Deng Peizhen(邓佩珍), Li Chengfu(李成富) et al. *Acta Photonica Sinia*(光学学报)[J], 2002, 22(1): 58

- [4] Kalisky Y, Kravchik L, Labbe C. *Opt Commun*[J], 2001, 189: 113
- [5] Pujol M C, Bursukova M A, Guell F *et al. Physical Review B* [J], 2002, 65: 1
- [6] Findlay D, Clay R A. *Phys Lett*[J], 1996, 20(3): 277

Growth and Properties of Nd³⁺:KGd(WO₄)₂ Laser Crystal

Wang Yuming^{1,2}, Zhang Lijie², Li Jianli², Lei Ming², Wang Yingwei², Liu Jinghe²

(1. School of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

(2. School of Materials and Chemical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Nd³⁺(3.2 at%):KGd(WO₄)₂ crystal was grown by TSSG method. The absorption spectrum and fluorescence spectrum of Nd³⁺:KGW crystal were measured, the absorption cross sections at 808 nm were calculated ($0.6799 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$), the output wavelength of fluorescence was 1068 nm and 1351 nm, and the lifetime was 112 μs . The diode-pumped laser was operated both in the free-running and passively Q-switched operating modes. The maximum laser output power was 326 mW with slope efficiency of 62.7% and 305 mW with slope efficiency of 57.8% respectively for the different samples when input power was 900 mW. The beam quality factor M^2 was lower than 1.2. We obtained green light of 532 nm in frequency doubling operation. The laser was passively Q-switched by using Cr⁴⁺:LuAG as saturable absorber. We obtained the pulse width of 170 ns upon repetitive frequency at 15 kHz.

Key words: Nd:KGW crystal; TSSG method; spectra properties; laser characteristics

Biography: Wang Yumin, Candidate for Ph. D., Changchun University of Technology, Changchun 130012, P. R. China, E-mail: sny2003@sina.com.cn