

文章编号: 0258-7025(2009)07-1894-06

# 掺铒碲酸盐玻璃基上转换光纤激光器的理论研究

周亚训 陈 芬 杨高波

(宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 建立了以掺铒碲酸盐玻璃光纤作为增益介质的上转换光纤激光器数值模型, 理论研究了碲酸盐玻璃基上转换光纤激光器的激光输出特性, 得到了 980 nm 抽运源激励下 546 nm 绿色激光信号输出功率与入射抽运功率、谐振腔光纤长度的变化关系。研究表明, 碲酸盐玻璃基上转换光纤激光器可以在厘米长度的增益介质上实现毫瓦功率的绿色激光输出, 斜率效率达到了 7% 左右。相比于报道的氟化物玻璃基上转换光纤激光器, 碲酸盐玻璃基上转换光纤激光器显示出一种潜在的小型化固体激光器特征。

**关键词** 激光器; 碲酸盐玻璃; 上转换光纤激光器; 数值模拟; 546 nm 绿色激光

**中图分类号** TN248.1; O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1894

## Theoretical Study of $\text{Er}^{3+}$ -Doped Tellurite-Based Upconversion Fiber Laser

Zhou Yaxun Chen Fen Yang Gaobo

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract** A numerical model of the upconversion fiber laser with gain media of erbium-doped tellurite-based glass fiber was presented. The lasing output performance of erbium-doped tellurite-based glass upconversion fiber laser was investigated theoretically, and the dependence of 546 nm green output power on launched 980 nm pump power and fiber length of resonant cavity were analyzed. The results indicate that erbium-doped tellurite-based glass upconversion fiber laser can achieve milliwatt lasing power in a resonant cavity length of centimeter order, and its slope efficiency reaches about 7%. Compared to the reported fluoride glass upconversion fiber laser, the erbium-doped tellurite-based glass upconversion fiber laser shows a potential small-scale characteristic of solid laser.

**Key words** lasers; tellurite-based glass; upconversion fiber laser; numerical simulation; 546 nm green lasing

## 1 引 言

蓝绿光波段激光在高密度数据存储、海底通信、大屏幕显示(需要蓝绿光构造全色显示)、检测、荧光防伪及激光医疗等领域有着广泛的应用价值<sup>[1~3]</sup>。目前,典型的蓝绿光波段激光器是氩离子激光器,这种气体激光器存在着体积大、寿命短(约 6000 h)和工作不稳定的缺点,给实际应用带来困难。对于固体激光器,获得蓝绿激光输出的方法主要有以下几种<sup>[4,5]</sup>: 1)利用宽禁带半导体材料直接制作蓝绿光波段半导体激光器; 2)利用非线性频率变换技术对近红外固体激光进行倍频; 3)利用上转换技术在掺稀土的晶体或玻璃中实现蓝绿激光输出。与其他方法相比,利用上转换技术,用近红外激光二极管(LD)抽运掺稀土离

子的玻璃光纤可获得较高亮度蓝绿激光输出,同时还具有结构简单、成本低的特点。稀土离子掺杂的上转换光纤激光器已成为国际上研究的热点。

目前,上转换光纤激光器的研究主要集中在氟化物玻璃基质中<sup>[6,7]</sup>,这主要得益于氟化物玻璃具有低的最大声子能量(约 500  $\text{cm}^{-1}$ )。低的声子能量减少了能级间无辐射弛豫的发生,提高了稀土离子中间亚稳态能级的荧光寿命,有效地提高了上转换发光效率。但氟化物玻璃基质耐潮性、化学稳定性、热稳定性和机械强度较差,很难满足实际应用的要求。因而近几年,研究人员将目光更多地关注到具有良好稳定性和机械强度同时又具有相对较低声子能量的氧化物玻璃上。在氧化物玻璃中,碲酸盐玻璃以其相对较

收稿日期: 2009-02-25; 收到修改稿日期: 2009-04-15

基金项目: 浙江省科技厅(2006C21082)、浙江省自然科学基金(Y107070)和宁波市自然科学基金(2006A610026)资助项目。

作者简介: 周亚训(1965—),男,教授,主要从事光纤通信与数字图像处理等方面的研究。

E-mail: zhouyaxun@nbu.edu.cn

低的最大声子能量(约  $750 \text{ cm}^{-1}$ )而受到关注<sup>[8]</sup>。日本 NTT 公司已经将稀土  $\text{Er}^{3+}$  离子掺杂的硝酸盐玻璃拉制成玻璃光纤, 光纤损耗也由最初的  $10 \text{ dB/m}$  降至  $0.02 \text{ dB/m}$ , 并成功地将其应用于掺铒光纤放大器中, 实现了  $90 \text{ cm}$  光纤长度下  $20 \text{ dB}$  信号增益带宽达  $80 \text{ nm}$ ( $1530 \sim 1610 \text{ nm}$ )的放大性能<sup>[9]</sup>。

本文对于掺铒硝酸盐玻璃光纤在上转换光纤激光器方面的潜在应用进行了理论研究, 得到了  $980 \text{ nm}$  抽运激励下上转换光纤激光器  $546 \text{ nm}$  绿色激光信号的输出特性。研究结果揭示了掺铒硝酸盐玻璃基上转换光纤激光器的激光输出特性以及与工作参数的关系。

## 2 546 nm 绿光上转换发光

图 1 是硝酸盐玻璃中简化的  $\text{Er}^{3+}$  离子能级图以及在  $980 \text{ nm}$  波长抽运下  $\text{Er}^{3+}$  离子的各种跃迁过程<sup>[10]</sup>。图中从左至右分别对应:  $980 \text{ nm}$  抽运波长下  $\text{Er}^{3+}$  离子的吸收和辐射跃迁、各能级间自发辐射和无辐射衰减跃迁、激光信号波长下的吸收和辐射跃迁以及协作上转换过程。掺  $\text{Er}^{3+}$  硝酸盐玻璃中,  $546 \text{ nm}$  上转换发光是一个双光子过程: 首先,  $\text{Er}^{3+}$  离子通过基态吸收(GSA), 由基态  $^4I_{15/2}$  激发至  $^4I_{11/2}$  能级上。处于  $^4I_{11/2}$  能级上的  $\text{Er}^{3+}$  离子再吸收一个  $980 \text{ nm}$  波长光子(即激发态吸收, ESA), 或者通过下列能量转移过程  $^4I_{13/2} + ^4I_{13/2} \Rightarrow ^4I_{9/2} + ^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{11/2} + ^4I_{11/2} \Rightarrow ^4F_{7/2} + ^4I_{15/2}$  跃迁至  $^4F_{7/2}$  能级, 然后迅速通过无辐射弛豫到中间态能级  $^2H_{11/2}$  并继续衰减至  $^4S_{3/2}$  能级, 并由  $^4S_{3/2}$  能级返回至基态  $^4I_{15/2}$  进而发射出  $546 \text{ nm}$  绿光信号。图 2 是  $980 \text{ nm}$  抽运下实验测量到的掺铒硝酸盐玻璃 ( $75\text{TeO}_2\text{-}20\text{ZnO-}5\text{NaO}_2$ ) 中上转换发光谱, 其中玻璃样品是用常规高温熔融猝火法制备的。由图可见, 在  $500 \sim 700 \text{ nm}$

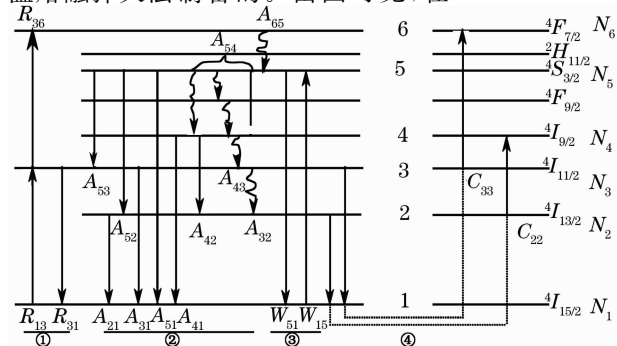


图 1 硝酸盐玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  离子能级示意图及其各种跃迁

Fig. 1 Schematic diagram of energy levels and transitions of  $\text{Er}^{3+}$  in tellurite glass

可见波长区域内, 观察到了强烈的对应于  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  能级间跃迁产生的  $546 \text{ nm}$  绿光发射, 而对应于能级  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  间跃迁产生的  $533 \text{ nm}$  绿光发射和能级  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  间跃迁产生的  $660 \text{ nm}$  红光发射相对比较微弱。这一现象与其他硝酸盐玻璃中观察到的结果相一致<sup>[11]</sup>。

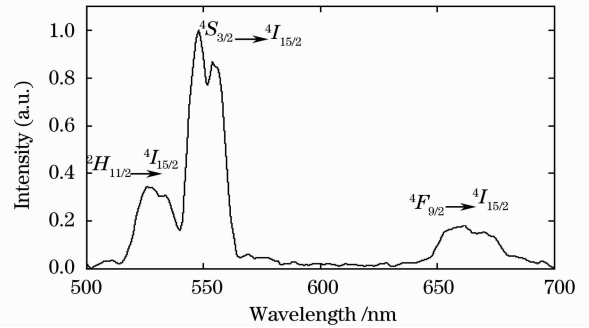


图 2 掺  $\text{Er}^{3+}$  硝酸盐玻璃的上转换发光光谱

Fig. 2 Upconversion spectrum of  $\text{Er}^{3+}$ -doped tellurite glass

## 3 理论模型

### 3.1 粒子数速率方程

将图 1 中能级  $^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$ ,  $^4I_{9/2}$ ,  $^4S_{3/2}$  和  $^4F_{7/2}$  分别标记为  $1 \sim 6$ , 而将这些能级上的粒子数分别标记为  $N_1 \sim N_6$ 。由于对应  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  和  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  能级间跃迁的上转换发光比较微弱, 在考虑  $546 \text{ nm}$  波长激光信号产生过程中, 激光腔内存在的模式竞争使得  $533 \text{ nm}$  绿光发射和  $660 \text{ nm}$  红光发射逐渐减弱。因此, 为了简化计算, 对于  $^2H_{11/2}$  和  $^4F_{9/2}$  这两个能级上的粒子数分布予以忽略不计。这样, 依据图 1,  $980 \text{ nm}$  抽运下各能级上的粒子数分布遵循<sup>[10~12]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} = & -R_{13}N_1 + R_{31}N_3 + A_{21}N_2 + A_{31}N_3 + \\ & A_{41}N_4 + A_{51}N_5 + W_{51}N_5 - W_{15}N_1 + \\ & C_{22}N_2^2 + C_{33}N_3^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} = & -A_{21}N_2 + A_{32}N_3 + A_{42}N_4 + \\ & A_{52}N_5 - 2C_{22}N_2^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} = & R_{13}N_1 - R_{31}N_3 - R_{36}N_3 - A_{31}N_3 - \\ & A_{32}N_3 + A_{43}N_4 + A_{53}N_5 - 2C_{33}N_3^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_4}{dt} = & -A_{41}N_4 - A_{42}N_4 - A_{43}N_4 + \\ & A_{54}N_5 + C_{22}N_2^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_5}{dt} = & -A_{51}N_5 - A_{52}N_5 - A_{53}N_5 - \\ & A_{54}N_5 + A_{65}N_6 - W_{51}N_5 + W_{15}N_1, \end{aligned}$$

$$\frac{dN_6}{dt} = R_{36}N_3 - A_{65}N_6 + C_{33}N_3^2$$

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 = N_0,$$

(1)

式中  $N_0$  为硝酸盐玻璃中  $\text{Er}^{3+}$  离子掺杂浓度。 $R_{36}$  为激发态吸收速率( ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$ )。 $A_{ij}$  为能级  $i, j$  间衰减速率( $A_{ij} = A_{ij}^R + A_{ij}^{NR}$ ), 包括了无辐射衰减速率和自发辐射跃迁速率。除了直接跃迁产生的贡献( ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$ ),  $A_{65}$  还包含了通过能级 ${}^2H_{11/2}$  过渡的非直接跃迁速率( ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$ ), 同样  $A_{54}$  也包含了这两种形式的跃迁速率。 $C_{22}$  和  $C_{33}$  分别是能级 ${}^4I_{13/2}$  和 ${}^4I_{11/2}$  的协作上转换系数: ${}^4I_{13/2} + {}^4I_{13/2} \Rightarrow {}^4I_{9/2} + {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{11/2} + {}^4I_{11/2} \Rightarrow {}^4F_{7/2} + {}^4I_{15/2}$ 。 $R_{13}$  和  $R_{31}$  分别是 980 nm 抽运波长下的受激吸收和受激辐射速率,  $W_{15}$  和  $W_{51}$  分别是 546 nm 激光信号波长下的受激吸收和受激辐射速率, 它们表示为

$$R_{ij}(r, \varphi, z) = \frac{\sigma_{ij}}{h\nu_p} P_p(z) \cdot \psi_p(r, \varphi),$$

$$W_{ij}(r, \varphi, z) = \frac{\sigma_{ij}}{h\nu_s} P_s(z) \cdot \psi_s(r, \varphi), \quad (2)$$

式中  $\sigma_{ij}$  为对应能级间跃迁的吸收和发射截面,  $h\nu_p$  和  $h\nu_s$  分别是抽运光子和激光信号光子能量,  $P_p(z)$  和  $P_s(z)$  分别是径向坐标  $z$  处抽运光和激光信号光功率,  $\psi_p(r, \varphi)$  和  $\psi_s(r, \varphi)$  是相应的模场分布。对于蓝绿光波段光纤激光器, 激光信号和抽运光一般仍以  $\text{LP}_{01}$  单模方式运作<sup>[12, 13]</sup>。

### 3.2 功率传输方程

在单向抽运光激励下, 谐振腔内光纤中的抽运光传输可以描述为

$$\frac{dP_p}{dz} = -2\pi \cdot P_p(z) \cdot \int_0^a (\sigma_{13} N_1 + \sigma_{36} N_2 - \sigma_{31} N_3) \times \psi_p(r) \cdot r dr - \alpha_p P_p(z), \quad (3)$$

这里  $\alpha_p$  是对应抽运波长下的光纤背景损耗,  $a$  是光

纤纤芯半径。对于 Fabry-Perot 光纤线性谐振腔结构, 光纤中的激光信号功率由前后向传输两部分组成, 即

$$P_s(z) = P_s^+(z) + P_s^-(z), \quad (4)$$

对于前向激光信号功率, 其在光纤中的传输分布为(反向激光信号, 形式类似)

$$\frac{dP_s^+}{dz} = 2\pi \left[ P_s^+(z) \int_0^a (\sigma_{51} N_5 - \sigma_{15} N_1) \psi_s(r) r dr + 2hc^2/\lambda^3 \int_0^a \sigma_{51} N_5 \psi_s(r) r dr \right] - \alpha_s P_s^+(z), \quad (5)$$

式中  $2hc^2/\lambda^3$  为自发辐射对激光功率的贡献<sup>[14]</sup>,  $\alpha_s$  为 546 nm 波长下的光纤背景损耗。(3) ~ (5) 式的求解需要用到边界条件

$$P_s^-(L) = P_s^+(L) \cdot R_2,$$

$$P_s^+(0) = P_s^-(0) \cdot R_1, \quad (6)$$

式中  $R_{1,2}$  是前后腔镜对激光信号反射率(假设对抽运光是全透射的),  $L$  是光纤长度。形成稳态激光振荡后, 光纤激光器的输出功率为

$$P_{\text{out}} = P_s^+(L) \cdot (1 - R_2). \quad (7)$$

## 4 模拟结果

根据建立的方程组(1)~(7), 对上转换光纤激光器的输出特性进行理论模拟。由于(1)~(7)式构成了一组耦合的非线性微分方程组, 很难进行解析求解, 因而采用数值计算。同时, 由于实验条件的制约, 无法测量和计算  $\text{Er}^{3+}$  离子在能级间跃迁对应的光谱参数, 因此模拟中相关参数取自于文献[10], 列于表 1 中。

表 1 掺铒硝酸盐玻璃基上转换光纤激光器的数值模拟参数

Table 1 Simulated parameters used in the Er-doped tellurite-based glass upconversion fiber laser

Decay rate of $\text{Er}^{3+}$ ion between different levels	$A_{65} = 39237 \text{ s}^{-1}$ $A_{51} = 2693 \text{ s}^{-1}, A_{52} = 984 \text{ s}^{-1}, A_{53} = 87 \text{ s}^{-1}, A_{54} = 2256 \text{ s}^{-1}$ $A_{41} = 455 \text{ s}^{-1}, A_{42} = 147 \text{ s}^{-1}, A_{43} = 10219 \text{ s}^{-1}$ $A_{31} = 398 \text{ s}^{-1}, A_{32} = 3769 \text{ s}^{-1}$ $A_{21} = 304 \text{ s}^{-1}$
Absorption and emission cross-section of $\text{Er}^{3+}$ ion	$\sigma_{13} = 4.48 \times 10^{-21} \text{ cm}^2, \sigma_{31} = 2.20 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ $\sigma_{15} = 6.41 \times 10^{-21} \text{ cm}^2, \sigma_{51} = 7.05 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ $\sigma_{36} = 6.80 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$
Upconversion coefficient of ${}^4I_{13/2}$ and ${}^4I_{11/2}$ levels	$C_{22} = 2.74 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}, C_{33} = 1.09 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$
Fiber core radius	$a = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$
Refractive index and relative difference	$n_1 = 2.08, \Delta = 0.5\%$
Doped concentration of $\text{Er}^{3+}$ ion	$N_0 = 3.4 \times 10^{20} / \text{cm}^3$
Fiber background loss	$\alpha_{980} = 0.10 \text{ dB/m}, \alpha_{546} = 0.20 \text{ dB/m}$
Mirror reflectivity coefficient	$R_1 = 0.99, R_2 = 0.80$

图 3 给出了入纤抽运功率分别为 250 mW, 300 mW 和 350 mW 情形下, 硝酸盐玻璃基上转换掺铈光纤激光器 546 nm 绿色激光信号输出功率随谐振腔光纤长度的变化关系。由图可见, 在 980 nm 波长抽运光激励下, 各输出功率曲线随着谐振腔光纤长度的增长呈现出了比较相近的变化特征: 1) 硝酸盐玻璃基上转换光纤激光器可以在厘米量级的光纤长度上形成激光振荡而得到毫瓦功率的绿色激光输出。这与报道的氟化物玻璃基上转换光纤激光器相比, 硝酸盐玻璃基上转换光纤激光器所需的光纤长度减少了 1 个数量级左右。短的光纤长度对于设计小型或集成化的固体激光器非常理想, 也有利于进一步降低系统成本。硝酸盐玻璃光纤所需长度较短, 主要在于硝酸盐玻璃基可以掺入高的铈离子浓度, 因此只需要一定的光纤长度就能充分吸收入射的抽运功率而形成粒子数反转; 2) 光纤长度较短时, 随着光纤长度的增长, 激光输出功率迅速提高。这是由于光纤长度的增长增大了对入射抽运功率的吸收, 使得激光能级上有更多的粒子数参与辐射跃迁; 3) 光纤长度增长到某一值时(最佳光纤长度), 激光输出功率达到极值, 这是在该工作参数条件下激光器所能提供的最大输出功率, 这时入射的抽运功率被完全吸收; 4) 随着光纤长度的继续增长, 激光输出功率发生衰减, 近似地随光纤长度而线性下降。这是由于抽运功率被耗尽后, 激光信号在后续光纤中传输时重被吸收的结果。实际上, 当掺杂光纤很长时, 入射的抽运功率只在距输入端附近的一段光纤长度内维持了激光能级上粒子数的反转, 这里激光信号的受激辐射超过了吸收。在剩余的光纤长度内

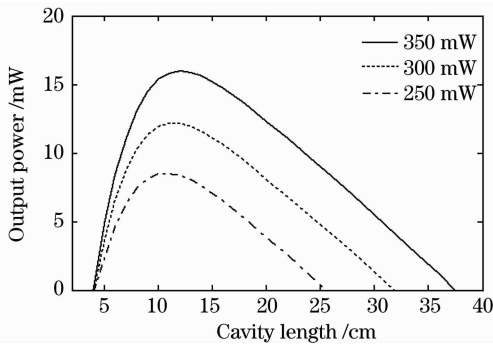


图 3 激光输出功率随谐振腔光纤长度的变化  
Fig. 3 Variation of the laser output power with respect to the cavity length

由于激光能级上粒子数的减少, 这时对激光信号的吸收超过了受激辐射, 因此随着光纤长度的增长, 激光输出功率衰减直至腔内振荡消失。

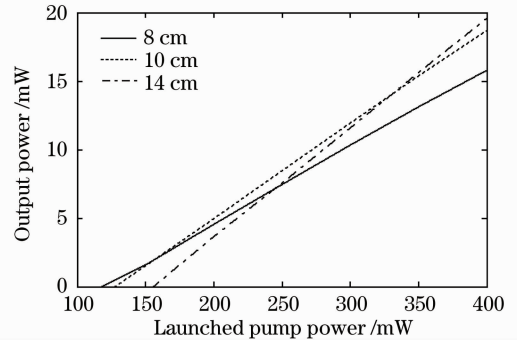


图 4 激光输出功率随入纤抽运功率的变化  
Fig. 4 Variation of the laser output power with the launched power

图 4 是在谐振腔光纤长度分别为 8 cm, 10 cm 和 14 cm 时激光输出功率与入纤抽运功率的变化关系。可以看到, 在一定的光纤长度和给定的工作参数条件下, 上转换激光器的 546 nm 绿色激光信号输出功率基本上随入纤抽运功率线性增长, 但不同光纤长度的上转换激光器其斜率效率和阈值功率是不一样的。光纤长度较短时, 由于对入射的抽运光吸收较少(或只有部分吸收), 因此输出功率和斜率效率相对较小, 同时由于光纤吸收损耗较小, 形成稳定激光振荡所需的阈值功率也要小些。例如, 在 8 cm 的光纤长度时, 激光器的阈值功率约为 117.6 mW, 斜率效率为 5.6%。光纤长度增长时, 斜率效率和阈值功率随之相应增大。例如, 光纤长度在 10 cm 和 14 cm 时, 激光器的阈值功率分别增大至 127.2 mW 和 155.3 mW, 而斜率效率分别提高至 6.8% 和 8.0%。

作为对比, 表 2 给出了一些氟化物玻璃基上转换掺铈光纤激光器激光输出特性的实验报道。研究显示, 以硝酸盐玻璃作为基质的上转换掺铈光纤激光器其激光特性可以与之相比拟, 说明硝酸盐玻璃掺铈光纤有望成为继氟化物玻璃光纤后的另一种新型上转换激光器的增益介质。但相对而言, 硝酸盐玻璃基具有更好的物化稳定性和机械强度, 其上转换掺铈光纤激光器具有更短的光纤长度, 因而是一种潜在的更为理想的小型化上转换固体激光器。

表2 一些报道的上转换光纤激光器激光特性

Table 2 Lasing performance of some reported upconversion fiber lasers

Glass fiber	Doped ion	Doped concentration /10 <sup>-6</sup>	Fiber length /cm	Pumped wavelength /nm	Pumped power /mW	Threshold power /mW	Lasing wavelength /nm	Lasing power /mW	Slope efficiency /%
ZBLAN <sup>[13]</sup>	Tm <sup>3+</sup>	1000	250	1130	890	80	480	106	13.0
Fluoride <sup>[15]</sup>	Pr <sup>3+</sup>	500	78	835/1017	42/250	80	492	22	8.0
			60	860	760	42	635	300	52.0
			60	860	430	29	615	44	11.5
ZBLAN <sup>[16]</sup>	Pr <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup>	3000/20000	42	860	200	26	520	20	12.4
			26	860	200	60	491	4	3.0
ZBLAN <sup>[17]</sup>	Pr <sup>3+</sup>	1000	95	835/1017	50/120	30	492	—	14.0
ZBLAN <sup>[18]</sup>	Pr <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup>	3000/20000	30	840	1600	140	491	165	12.1
ZBLAN <sup>[19]</sup>	Pr <sup>3+</sup> /Yb <sup>3+</sup>	3000/20000	40	838	500	50	635	3	—
ZBLAN <sup>[20]</sup>	Tm <sup>3+</sup>	2500	38	1112	600	77	481	36	7.0
ZBLAN <sup>[21]</sup>	Tm <sup>3+</sup>	1000	180	1120	1050	272	480	116	15.0

## 5 结 论

硝酸盐玻璃基掺铒光纤作为 1.5 μm 波段光纤放大器的宽带增益介质已得到广泛应用,本文对于其在 546 nm 可见绿光上转换光纤激光器方面的潜在应用进行了初步研究。理论研究表明,硝酸盐玻璃基质由于具有低的声音能量和高的稀土铒离子溶解性,在 980 nm 波长抽运源连续激励下,可以在厘米量级的光纤长度上获得毫瓦级功率的绿光激光输出,因而是一种潜在的小型化上转换固体激光器。

## 参 考 文 献

- 1 A. S. Oliverira, M. T. De-Araujo, A. S. Gouveia-Neto *et al.*. Upconversion fluorescence spectroscopy of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-doped heavy metal Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>O-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-GeO<sub>2</sub> glass [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(1): 604~606
- 2 Shilong Zhao, Zheng Fei, Shiqing Xu *et al.*. Er<sup>3+</sup>-doped phosphor-tellurite glass for broadband short-length Er<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 276~278
- 3 Zhou Yaxun, Wang Jun, Dai Shixun *et al.*. Effect of Yb<sup>3+</sup> on infrared and upconversion emission of Er<sup>3+</sup>-doped tellurite-based glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1688~1693  
周亚训, 王俊, 戴世勋等. Yb<sup>3+</sup>对掺铒硝酸盐玻璃红外和上转换发光的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1688~1693
- 4 Song Feng, Chen Xiaobo, Zhang Guangyin. Upconversion fiber lasers doped with rare-earth ions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1997, **34**(5): 1~5  
宋峰, 陈晓波, 张光寅. 掺稀土离子的上转换光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 1997, **34**(5): 1~5
- 5 Chen Xiaobo, Zhang Guangyin, Song Zengfu. Research and development about upconversion luminescence and lasers of rare-earth ions materials [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1995, **15**(3): 1~6  
陈晓波, 张光寅, 宋增福. 稀土化合物材料上转换发光与激光的研究与进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 1995, **15**(3): 1~6
- 6 M. P. LeFlochic, J. Y. Allain, G. M. Stephan *et al.*. Room-temperature continuous-wave upconversion laser at 455 nm in a Tm<sup>3+</sup> fluorozirconate fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1982~1984
- 7 R. Paschotta, P. R. Barber, A. C. Tropper *et al.*. Characterization and modeling of thulium: ZBLAN blue upconversion fiber lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(5): 1213~1218
- 8 F. Vetrone, J. C. Boyer, J. A. Capobianco *et al.*. 980 nm excited upconversion in an Er-doped ZnO-TeO<sub>2</sub> glass [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(10): 1752~1754
- 9 Y. Ohishi, A. Mori, M. Yamada *et al.*. Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5 μm broadband amplification [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 274~276
- 10 Y. D. Hu, S. B. Jiang, G. Sorbello *et al.*. Numerical analyses of the population dynamics and determination of the upconversion coefficients in a new high erbium-doped tellurite glass [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(12): 1928~1934
- 11 A. Kanoun, N. Jaba, H. Mejri *et al.*. Effects of activator ion concentration on the upconversion processes in Er<sup>3+</sup>-doped TeO<sub>2</sub>-ZnO glass [J]. *Phys. State Solids*, 2001, **188**(3): 1145~1151
- 12 F. Brunet, P. Laperle, R. Vallee *et al.*. Modeling of Tm-doped ZBLAN blue upconversion fiber lasers operating at 455 nm [C]. *SPIE*, 1999, **3849**: 125~135
- 13 S. Sanders, R. G. Waarts, D. G. Mehurys *et al.*. Laser diode pumped 106 mW blue upconversion fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13): 1815~1817
- 14 I. Kelson, A. Hardy. Strongly pumped fiber laser [J]. *J. IEEE Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1570~1577
- 15 Y. Zhao, S. Fleming, S. Poole. 22 mW blue output power from Pr<sup>3+</sup> fluoride fibre upconversion laser [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **114**(3-4): 285~288
- 16 P. Xie, T. R. Gosnell. Room-temperature upconversion fiber laser tunable in the red, orange, green, and blue spectral regions [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1014~1016
- 17 Y. X. Zhao, S. Fleming. Analysis of the effect of numerical aperture on Pr: ZBLAN upconversion fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(5): 373~375
- 18 H. Zellmer, P. Riedel, A. Tunnermann. Visible upconversion lasers in praseodymium-ytterbium-doped fibers [J]. *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, 1999, **69**(5-6): 417~421
- 19 D. M. Costantini, H. G. Limberger, T. Lasser *et al.*. Actively mode-locked visible upconversion fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1445~1447
- 20 P. Laperle, R. Vallee, A. Chandonnet. Stability aspects in the operation of a 2500 ppm thulium-doped ZBLAN fiber laser at 481 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **175**(1-3): 221~226



21 G. Qin, S. Huang, Y. Feng *et al.*. Photodegradation and photocuring in the operation of a blue upconversion fiber laser

[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(12): 126108

### 76 W 连续波 1064 nm 国产 Nd:YAG 透明陶瓷激光器

透明多晶激光陶瓷相对单晶激光介质而言,具有生产成本低、易大尺寸制造、可高浓度掺杂、结构灵活等优点,近年来成为高功率全固态激光领域的研究热点,国内多家单位也相继开展了激光陶瓷制备与激光特性的研究工作。2006年,中国科学院上海光学精密机械研究所的徐军等利用 808 nm 激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YAG 陶瓷(由中国科学院上海硅酸盐研究所制备),实现了激光输出,输出功率为 1003 mW;2007年,本研究组的陈亚辉等实现了国产激光陶瓷 10 W 热容运转;2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员采用侧面抽运 Nd:YAG 陶瓷,获得了准连续 23 W 激光输出,光-光转换效率为 8%。但是,国产陶瓷的光学质量与晶体相比依旧有一定差距,散射与吸收等损耗系数远大于相应的激光晶体,约为  $0.06 \text{ cm}^{-1}$ 。

最近,中国科学院上海硅酸盐研究所经过多年研究探索,烧制制备出了高光学质量的透明陶瓷,其激光特性可与晶体媲美。我们对该陶瓷进行了激光特性实验。由于 885 nm 直接抽运技术相对 808 nm 传统抽运而言,具有量子亏损小、抽

运效率高、便于热管理等优越性,并有利于发挥陶瓷可高掺杂的特点,因此,采用 885 nm 光纤耦合激光二极管作为抽运源。

光路示意图如图 1 所示,其中  $M_1$  为抽运光输入、激光高反镜, $M_2$  为输出耦合镜, $M_3$  将剩余的抽运光与 1064 nm 激光分开,P 为激光功率计。实验中,采用短平平腔结构,利用 885 nm LD 端面抽运掺杂原子数分数为 1%、长度为 40 mm 的 Nd:YAG 陶瓷棒。LD 光纤直径为  $400 \mu\text{m}$ ,经过 1:4 的耦合头后抽运到陶瓷端面。激光陶瓷被固定在自制的水冷装置内进行冷却。输出耦合镜的透过率  $T$  为 10%,15%,20% 和 24%。当  $T=15\%$  时,陶瓷激光器的输出性能最佳。吸收功率为 129 W 时,最大输出功率达到 76 W,光-光转换效率与斜效率分别为 59%和 63%,远高于以往国产陶瓷激光器的实验结果。为了对比起见,采用相同腔型,对单端键合 5 mm YAG,掺杂原子数分数为 1%、长度为 35 mm 的单晶 Nd:YAG 激光棒进行了实验研究,其最大输出功率为 83.6 W,略高于陶瓷。

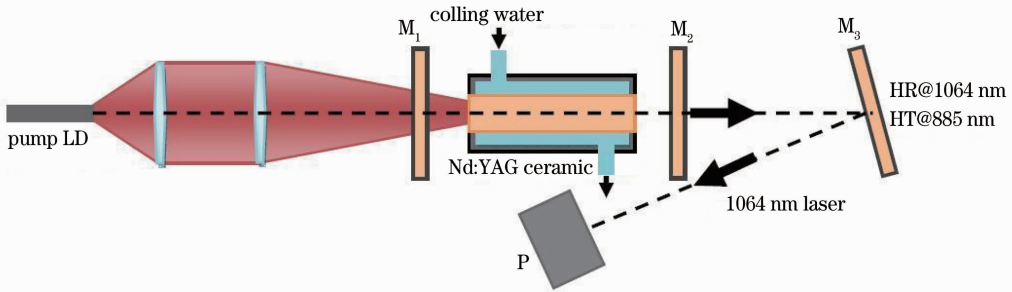


图 1 实验光路示意图

Fig. 1 Experimental setup of diode pump Nd:YAG laser

图2给出了 Nd:YAG 陶瓷及单晶的输出特性曲线。可见,陶瓷的激光性能已接近于晶体,这说明我国激光陶瓷的

制备技术取得了长足进步,其代替晶体作为激光增益介质成为可能。

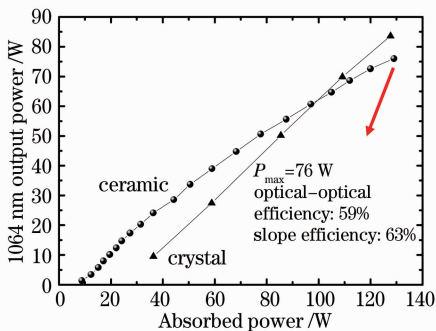


图 2 Nd:YAG 陶瓷及单晶输出特性曲线

Fig. 2 Output power of Nd:YAG ceramic and crystal

宗 楠<sup>1,4</sup> 张小富<sup>1,4</sup> 李芳琴<sup>1,4</sup> 马庆磊<sup>1,4</sup> 王宝山<sup>3</sup>  
薄 勇<sup>3</sup> 彭钦军<sup>3</sup> 崔大复<sup>3</sup> 许祖彦<sup>3</sup> 刘文斌<sup>2</sup>  
姜本学<sup>2</sup> 冯锡洪<sup>2</sup> 潘裕柏<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> 中国科学院物理研究所,北京 100190
- <sup>2</sup> 中国科学院上海硅酸盐研究所,上海 201800
- <sup>3</sup> 中国科学院理化技术研究所,北京 100190
- <sup>4</sup> 中国科学院研究生院,北京 100190

基金项目:国家自然科学基金重大项目(50590404)和上海市重大基础研究项目(07DJ14001)资助课题。

(收稿日期:2009-05-22)