

文章编号: 1001-3806(2006)02-0119-04

## 准四能级双掺 Tm/Ho 钆酸钷激光器

张兴宝, 姚宝权, 王月珠\*, 鞠有伦

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 在考虑两种离子发光的动力学进展基础上, 描述了  $2\mu\text{m}$  双掺铥钷 (Tm/Ho) 系统 Tm-Ho 能量转移基本过程, 建立双掺 Tm/Ho 系统准四能级速率方程, 得出阈值抽运功率和斜率效率的表达式, 并利用得出的结论去分析在液氮制冷下光纤耦合激光二极管 (LD) 端面抽运掺铥钷钆酸钷 (Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub>) 激光器实验。通过实验, 实现了  $2\mu\text{m}$  Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 激光器的运转, 在抽运功率 14W 时, 激光输出功率 3.5W, 光-光转换效率 25%, 阈值抽运功率 838mW, 理论和实验有很好的一致性。同时也对实验中观测到的上转换绿荧光现象进行了定性的分析。

关键词: 固体激光; 光纤耦合 LD; Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体; 准四能级; 能量转移

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Quasi-four-level co-doped Tm/Ho gadolinium vanadate laser

ZHANG Xing-bao, YAO Bao-quan, WANG Yue-zhu, JU You-lun

(Harbin Institute of Technology, Institute of Opto-Electronics, Harbin 150001, China)

**Abstract** Based on considering kinetic evolution of the emissions of both ions, the basic processes of energy transfer between thulium (Tm) and holmium (Ho) was analyzed, the quasi-four-level rate equation of thulium (Tm)/holmium (Ho) doped gadolinium vanadate (Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub>) are given. The expression about threshold pump power and slope efficiency are concluded. At liquid nitrogen cooled temperature the operation of  $2\mu\text{m}$  Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by fiber-coupled laser diode (LD) is achieved experimentally. At 14W pump power the maximum 3.5W output power, optical-optical conversion efficiency of 25%, slope efficiency of 26% and pumping threshold of 838mW were obtained, theoretical results with experiment results are good agreement. The observed green fluorescence duo to result of up-conversion effect is also analyzed.

**Key words** solid-state laser; fiber-coupled LD; Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> crystal; quasi-four-level; energy transfer

### 引 言

在过去 10 年中, 掺铥钷 (Tm/Ho) 的激光器引起人们莫大的兴趣。这种激光器被认为是用于医学治疗、人眼安全远程探测系统<sup>[1]</sup>的最佳候选者, 如: 激光测距、相干多普勒测风雷达、水蒸气抛面系统<sup>[2]</sup>。以 Tm 作敏化离子的掺钷 (Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub>) 钆酸钷晶体具有良好的光物理和化学特性。同氟化钇锂 (YLF) 和 YAG 基质相比, GdVO<sub>4</sub> 晶体中 Tm<sup>3+</sup> 离子有非常强的和宽的吸收带, 所以该晶体非常适合激光二极管抽运; 而且 GdVO<sub>4</sub> 有大的热导率 ( $10\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  @ 300K), 晶体热效应小。虽然 GdVO<sub>4</sub> 是非常有前景的优质激光材料, 但 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 激光器仅有少数文献报道。WYSS<sup>[3,4]</sup> 等人对 Tm:GdVO<sub>4</sub> 激光进行了的研究,

MORRIS<sup>[5]</sup> 使用 Ti:sapphire 激光抽运 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体, 实现  $2\mu\text{m}$  输出, 但斜率效率低, 只有 3.4%。哈尔滨工业大学的学者利用激光二极管 (LD) 光纤耦合抽运 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体, 实现  $2\mu\text{m}$  3.5W 输出, 效率达 25%。激活离子 Ho<sup>3+</sup> 从 <sup>5</sup>F<sub>4</sub> 能级到 <sup>5</sup>I<sub>6</sub> 能级跃迁过程中发出  $2\mu\text{m}$  激光。掺入的 Tm<sup>3+</sup> 敏化离子有效吸收抽运光而使激光阈值降低, 激光转换效率提高。不利的是, 双掺 Tm/Ho 比单掺 Ho<sup>3+</sup> 激光更容易发生上转换过程<sup>[6,7]</sup>, 在很多种被研究的基质中证明上转换过程是有害的, 然而通过降低温度可有效地抑制上转换过程。双掺 Ho/Tm 晶体复杂的动力学过程被大量地研究, 并将理论模型用于激光器设计和优化激光特性<sup>[8,9]</sup>。该理论建立的是 Tm/Ho 准三能级系统模型, 而在低温可以被认为四能级系统。作者在考虑两种离子发光的动力学进展基础上, 详细描述了 Tm-Ho 能量转移基本过程, 建立含有上转换过程的双掺 Ho/Tm: 激光器准四能级速率方程, 得出阈值抽运功率和斜率效率的表达式。并利用得出的结论去分析 LD 光纤耦合端抽运 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 激光器实验。

作者简介: 张兴宝 (1973-), 女, 博士研究生, 现从事二极  
管抽运固体激光器与非线性光学研究。

通讯联系人。E-mail: wangyuezh@hit.edu.cn

收稿日期: 2004-12-29; 收到修改稿日期: 2005-08-23

# 1 光纤耦合激光二极管端面抽运 Ho/Tm:GdVO<sub>4</sub> 激光器实验

## 1.1 实验装置

光纤耦合激光二极管端面抽运激光器实验装置如图 1 所示。两个消色差透镜焦距分别 35mm, 50mm;

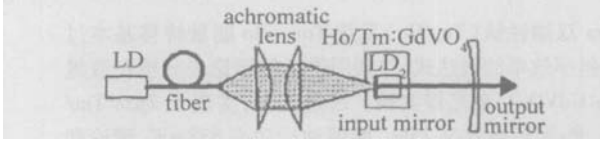


Fig 1 Schematic diagram of a fiber-coupled diode end-pumped Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> laser

在抽运输入端制冷室的窗片作为输入镜,它对 792nm 抽运光高透 ( $T > 96\%$ ),对 2 $\mu\text{m}$  激光全反 ( $R = 99\%$ ),输出镜为凹透镜,对 792nm 光全反,对 2 $\mu\text{m}$  激光透过率为 10% ~ 40%,凹透镜的曲率半径为 -300mm,总的腔长大约 15cm; Tm (质量分数为 5%) / Ho (质量分数为 0.5%):GdVO<sub>4</sub> 激光晶体大小是 5mm × 5mm × 10mm, a 轴切割,采用导热性能很好的紫铜作为晶体的热沉,晶体由铝箔 (120 $\mu\text{m}$  厚)包裹放在热沉上,热沉放入由液氮致冷的装置中,晶体温度降到 80K; 光纤耦合二极管为抽运源,最大的输出 15W,二极管设定温度 20°,使光纤输出中心波长在 792nm,对应于 Tm<sup>3+</sup> 离子强的吸收峰,从而有效地吸收抽运光,光纤数值孔径 0.22,光纤输出端直径 0.8mm,被消色差透镜缩小 1.5 倍,聚焦到晶体上平均光斑半径为 0.28mm。

采用中国科学院物理研究所的 LPE-1A 型功率计测量激光输出功率。输出激光波长在 2.048 $\mu\text{m}$  附近,利用光导型红外探测器 PbS 和前置放大器,以及 W DG 50 光栅单色仪配合 TDS380 示波器对激光输出波长进行测量。将光栅单色仪的入口正对谐振腔的出口,在光栅单色仪的出口端放置探测器,它采集到的信号输入到示波器中,通过示波器观察信号,测量时针对不同的波长选用不同的光栅。实验时转动光栅单色仪鼓轮,当观察到信号时读出鼓轮读数即可得出波长值。

## 1.2 实验结果与分析

在 LD 抽运功率 14W 时,实验获得最大激光输出功率 3.5W,光-光转换效率 25%,阈值抽运功率 838mW,与理论值基本符合。其阈值比单掺 Tm:GdVO<sub>4</sub> 激光器<sup>[3]</sup> (310mW) 高,主要是由于上述分析的双掺 Tm/Ho 比单掺 Ho 或 Tm 激光更容易发生上转换的原因引起的。另外,文献 [4] 中指出,在抽运波长为 797nm 时,阈值为 670mW; 在抽运波长为 806nm 时,阈值为 790mW,由于 Tm 具有吸收带宽 (770nm ~ 820nm) 的优势,所以抽运波长对阈值影响不大。图 2 为 LD 输入抽运功率和激光输出功率的关系,输入和

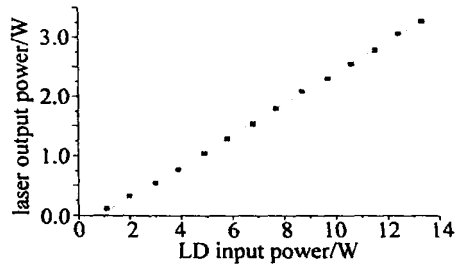


Fig 2 Output power versus pump power

输出功率成线性变化,图形没有弯曲、饱和,热效应在低功率时影响不明显。但在实验中用肉眼能观测到 540nm 左右的绿色上转换荧光信号,其来源于 Ho<sup>3+</sup> 离子跃迁 <sup>5</sup>S<sub>2</sub> - <sup>5</sup>I<sub>8</sub> (539nm ~ 550nm),以及 Tm<sup>3+</sup> 离子 <sup>5</sup>F<sub>4</sub> - <sup>5</sup>I<sub>8</sub> (534nm ~ 546nm),特别是无激光输出时,发光很强,而有激光输出时,削弱很多。是因为有激光输出时,由于腔内的粒子数平衡,激光上能级的离子数减少,使得上转换几率变小。除了肉眼观测到的绿荧光还有红外 1000nm ~ 1500nm 之间发射。参与上转换的激发态能量约 1/2 转化为热。部分被吸收的抽运光能量通过无辐射过程以热的形式耗散掉,这既降低了激光效率,又造成热透镜效应,事实上改变了腔参数,使得二极管抽运的固体激光器在大功率变化范围内的稳定运转成为难题。抽运光与激光光子能量差 (量子缺陷) 是最基本的热产生源,对于 Ho/Tm:GdVO<sub>4</sub> 激光有  $(2.048 - 2 \times 0.792) / 2.048 = 22.7\%$  的能量变成热。除此之外,交叉弛豫淬灭、浓度淬灭、激光激发态吸收,以及上转换等,也是热产生的重要因素。上转换对热透镜效应的影响不仅表现在更多的热量的产生上,另外,由于上转换几率与抽运光功率密度的平方成正比,所以在抽运光的光束截面内,上转换加剧了热的不均匀性,使热透镜效应增大。所以在大功率激光运转时,必须考虑上转换效应。可以采取降低晶体温度和合理选择掺杂浓度等办法来抑制上转换发光。图 3 显示了

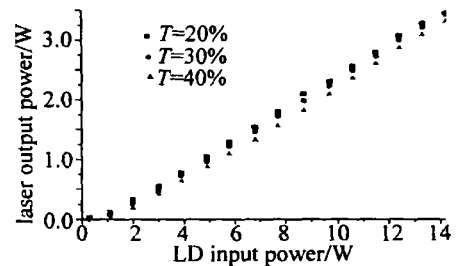


Fig 3 Output power versus pump power at different  $T$

最佳输出镜耦合透过率在 20% ~ 40% 之间时,稳定的激光输出。图 4 为输入抽运功率和光-光转换效率的关系。在抽运初期效率很快增加,在抽运功率大于 5W 以后,效率缓慢增加。在抽运功率为 14W 时,最大激光输出功率为 3.5W,相应的光-光转换效率为 25%。转换效率比文献 [5] 中报道的 3.4% 要高。图 5 显示了激光二极管温度分别为 20°C, 23°C 和 25°C 时

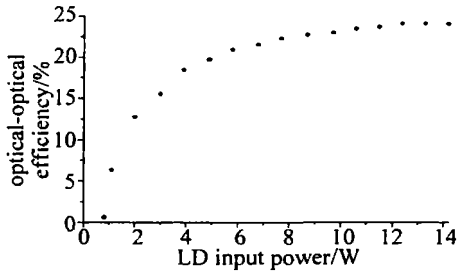


Fig 4 Pump power versus conversion efficiency

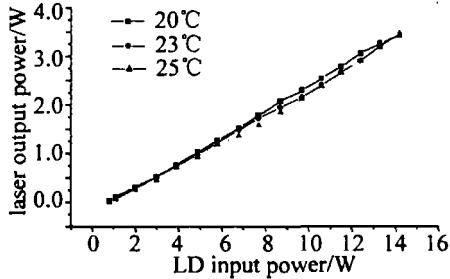


Fig 5 Output power versus pump power at different temperature

抽运输入功率和输出功率的关系, 实验结果表明, 输出功率受二极管温度变化影响不大, 显示了 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体宽吸收带的优越性。

## 2 理论分析

### 2.1 Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 系统能量传递动力学过程分析

由图 6 所示的 Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 粒子的能级和跃迁可

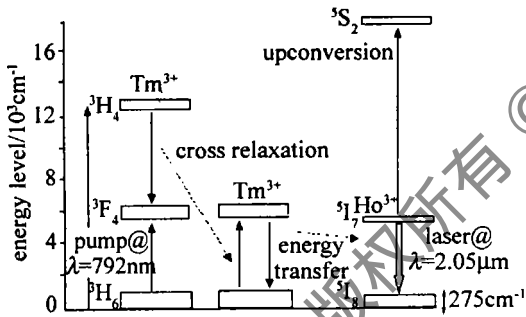


Fig 6 Energy level scheme of Tm/Ho

见: (1) 中心波长为 792nm 的抽运光把 <sup>3</sup>H<sub>6</sub>Tm<sup>3+</sup> 态粒子激发到 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级; (2) 当 Tm<sup>3+</sup> 的掺杂质量分数超过约 2% 时, Tm<sup>3+</sup> 离子间的横向弛豫过程就会发生, 一个 <sup>3</sup>H<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup> 通过与其相邻的 Tm<sup>3+</sup> 横向弛豫产生了两个 <sup>3</sup>F<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup>, 这个过程大约有 75% 的能量效率, 而另外 25% 的能量被转化为晶体热量; (3) 同时伴随着 <sup>3</sup>F<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup> 和 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>Ho<sup>3+</sup> 离子间的能量传递过程, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup> 离子向 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>Ho<sup>3+</sup> 离子传递时间非常短, 大约 5μs~10μs 而且 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 和 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 的能级寿命 τ<sub>2</sub> 和 τ<sub>3</sub> 约为 10ms 另外 Ho<sup>3+</sup> 的 <sup>5</sup>I<sub>7</sub> 能级和 Tm<sup>3+</sup> 的 <sup>3</sup>F<sub>4</sub> 能级十分接近, 可以把 <sup>3</sup>F<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup> 和 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>Ho<sup>3+</sup> 耦合成一个能级, 作为激光上能级<sup>[10]</sup>; (4) 随着 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>Ho<sup>3+</sup> 和 <sup>3</sup>F<sub>4</sub>Tm<sup>3+</sup> 态粒子数增大, 产生上转换过程, 发生上反转的离子通过能量传递或无辐射跃迁返回到激光上能级, 激光上能级寿命由于上转

换过程而减小; (5) <sup>5</sup>H<sub>07</sub><sup>3+</sup> 态粒子数聚积到一定程度, 就会向 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> 态跃迁产生了 2μm 的激光。

### 2.2 Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 准四能级速率方程

Ho<sup>3+</sup> 的各个多重态 Stark 能级粒子数遵守玻耳兹曼分布, 在低温时, 从激光上能级 <sup>5</sup>H<sub>07</sub><sup>3+</sup> 跃迁到激光下能级 <sup>5</sup>I<sub>8</sub> 的粒子迅速以无辐射跃迁形式弛豫到基态。可以认为 Tm<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> 系统是准四能级系统<sup>[9]</sup>。假设抽运光和激光都是高斯光束, 根据图 1 可以列出四能级速率方程<sup>[6-11]</sup>:

$$\frac{dN_x}{dt} = \eta_p R_p - \frac{N_x}{\tau} - K_u N_x^2 - \frac{\sigma c}{n} (\beta_{Ho} N_x) \varphi \varphi_0(r, z) \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\sigma c \varphi}{n} \iiint V(r, z) \varphi_0(r, z) dV - \frac{\varphi}{\tau_c} \quad (2)$$

式中, N<sub>x</sub> 为耦合上能级粒子数; t 为时间; η<sub>p</sub> 为抽运量子效率; R<sub>p</sub>(r, z) 为抽运抽运速率, R<sub>p</sub>(r, z) = R<sub>r</sub>(r, z), r<sub>p</sub>(r, z) 为抽运光归一化空间分布函数, R 为抽运速率, R = η<sub>a</sub>P<sub>in</sub>/hν<sub>p</sub>, P<sub>in</sub> 为入射抽运功率, hν<sub>p</sub> 为抽运光子能量, η<sub>a</sub> 为抽运吸收效率; τ 为耦合能级寿命; K<sub>u</sub> 为上转换系数; σ 为 Ho<sup>3+</sup> 的受激发射截面; n 为增益介质的折射率; c 为真空中的光速; ΔN = β<sub>Ho</sub>N<sub>x</sub> 为反转粒子数密度, β<sub>Ho</sub> 为 <sup>5</sup>I<sub>7</sub>Ho<sup>3+</sup> 能级粒子比例分数<sup>[10]</sup>; φ 为腔内的光子数, φ(r, z) 为光子数密度, φ(r, z) = φφ<sub>0</sub>(r, z), φ<sub>0</sub>(r, z) 为振荡光归一化空间分布函数, ∫<sub>腔内</sub> φ<sub>0</sub>(r, z) dV = ∫<sub>腔内</sub> r<sub>p</sub>(r, z) dV = 1; V 是激光腔体积; 腔内光子寿命 τ<sub>c</sub> = 2L<sub>eff</sub>/cδ, L<sub>eff</sub> = l<sub>c</sub> + (n-1)l, δ 为腔内的往返损耗, l<sub>eff</sub>, l<sub>c</sub> 分别为有效腔长、晶体长度和腔长。

### 2.3 激光器的抽运阈值

令激光饱和光强 I<sub>sat</sub> = n/σcτβ<sub>Ho</sub>。在稳态时, 将 (1) 式代入 (2) 式得到 (3) 式:

$$P_{in} = \frac{I_{sat} h \nu_p \delta c}{2 \eta_a \eta_p l_{eff}} \times \left\{ \int \left[ \frac{2 \varphi_0 r_p}{1 + \frac{\varphi \varphi_0}{I_{sat}}} + \left[ \left( 1 + \frac{\varphi \varphi_0}{I_{sat}} \right)^2 + \frac{4 K_u \tau^2 \eta_a \eta_p P_{in} r_p}{h \nu_p} \right]^{1/2} \right]^{-1} \right\} \quad (3)$$

当光子数 φ = 0 时, 采用一阶近似方法, 从上式得到阈值抽运功率表达式:

$$P_{th} = P_0 \left[ 1 + \frac{K_u \tau^2 \eta_p \eta_a P_0}{h \nu_p} \frac{B_2}{B_0} \right] \quad (4)$$

式中, P<sub>0</sub> = I<sub>sat</sub>hν<sub>p</sub>δc / (2η<sub>p</sub>η<sub>a</sub>l<sub>eff</sub>B<sub>0</sub>), B<sub>0</sub> = 2 / (πl<sub>c</sub> · 1 / (ω<sub>1</sub><sup>2</sup> + ω<sub>p</sub><sup>2</sup>)), B<sub>2</sub> = 2α [1 + exp(-αL)] / (ω<sub>1</sub><sup>2</sup>π<sup>2</sup>l<sub>c</sub> [1 - exp(-αL)] (ω<sub>1</sub><sup>2</sup> + 2ω<sub>1</sub><sup>2</sup>)), B<sub>0</sub> 和 B<sub>2</sub> 为重叠积分因子, ω<sub>1</sub>, ω<sub>p</sub> 分别是激光光斑半径和抽运光光斑

半径,  $\alpha$ 是抽运光吸收系数。

### 2.4 近阈值时的激光输出功率和斜效率

在近阈值时, 有  $\varphi_0(r, z) \ll I_{sat} = n/c\sigma\tau\beta_{Ho}$ , 输出功率和腔内光子数的关系为  $P_{out} = \phi h\nu_c T / 2nl_{eff}$ , 从 (3)式近似计算得到激光输出功率和斜率效率:

$$P_{out} = \frac{2h\nu_c T B_0}{3l_{eff}\sigma\tau\beta_{Ho}B_1} \frac{(P_{in} - P_{th})}{P_0} = \frac{4\eta_a \eta_p B_0^2 \nu_c T}{3B_1 \nu_p n \delta} (P_{in} - P_{th}) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} - P_{th}} = \frac{4\eta_a \eta_p B_0^2 \nu_c T}{3B_1 \nu_p n \delta} \quad (6)$$

从上述推导出的 (4)式明显看出, 上转换系数  $K_u$  的存在使激光阈值增加, 因此, 从 (5)式得出的输出功率降低。并且从 (1)式右边第 3项可以发现, 上转换过程是非线性的, 上转换速率与激光上能级粒子数平方成正比。此外值得注意的是, 在大功率运转时, 上转换的影响会越来越显著, 尤其在调 Q 和放大器运转时。计算参数为:  $\eta_p = 1.5$ ,  $\sigma = 2.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,  $\omega_p = \omega_1 = 280\text{THz}$ ,  $\nu\delta = 3\% + 30\%$ ,  $\tau = 10\text{ms}$ ,  $\alpha = 6\text{cm}^{-1}$ ,  $\beta_{Ho} = 0.5$ ,  $K_u = 6 \times 10^{-18} \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $l_c = 15\text{cm}$ ,  $l = 1\text{cm}$ , 理论计算斜率效率 26.3%, 阈值抽运功率 747mW, 上转换对阈值的贡献占 40%以上。

### 3 结 论

在低温时, 双掺 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 激光器是准四能级系统。建立了含有上转换过程的双掺 Tm/Ho准四能级速率方程, 得出阈值抽运功率和斜率效率的表达式; 对光纤耦合 LD 端面抽运 Tm/Ho:GdVO<sub>4</sub> 晶体进行了实验研究, 获得最大激光输出功率 3.5W、光-光转换效率 25%、阈值抽运功率 838mW 的结果, 理论和实验基本符合。另外, 对实验中观测到的上转换绿荧光现

象进行定性的分析, 上转换过程是非线性的, 上转换速率与激光上能级粒子数平方成正比, 在抽运功率提高时, 上转换的影响会越来越显著。上转换过程分析对今后的调 Q 激光器及其放大器实验起到指导作用。

### 参 考 文 献

[ 1 ] HENDERSON SW, SUNI P JM, HALE C P *et al* Coherent laser radar at 2 $\mu$ m using solid-state lasers [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1993 31(1): 4~ 15

[ 2 ] TACZAK TM, KILLINGER D K. Development of a tunable narrow linewidth CW 2.066 $\mu$ m Ho:YLF laser for remote sensing of atmospheric CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O [ J ]. Appl Opt 1998, 37(36): 8460~ 8465.

[ 3 ] WYSS C P, LUTHY W. Performance of a Tm<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub> microchip laser at 1.9 $\mu$ m [ J ]. Opt Commun, 1998 153: 63~ 67.

[ 4 ] WYSS C P, LUTHY W, WEBER H P *et al* Emission properties of a Tm<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub> microchip laser at 1.9 $\mu$ m [ J ]. Appl Phys 1998 B67 (5): 545~ 548

[ 5 ] MORRIS P J, LUTHY W, WEBER H P. Laser operation and spectroscopy of Tm:Ho:GdVO<sub>4</sub> [ J ]. Opt Commun 1994, 111: 493~ 496.

[ 6 ] ZHANG X L, WANG Zh YAO B Q *et al* Experiment study of 2 $\mu$ m wavelength Tm:Ho:YLF microchip laser [ J ]. Laser Technology 2002 26(6): 407~ 408 (in Chinese).

[ 7 ] FALCONERIM, LANZIA, SALVETTI G. Spectroscopic investigation of the visible and mid-infrared emission in Tm- and Ho-doped YAG and YLF crystals [ A ]. Proc of CLEO [ C ]. Europe CLEO, 1994. 132~ 133

[ 8 ] BARNES N P, FILER E D, MORRISON C A. Ho:Tm lasers - Theoretical [ J ]. IEEE JQE 1996, 32(1): 92~ 103

[ 9 ] TACZAK TM. Development of a tunable narrow linewidth 2.066 $\mu$ m external-cavity, thulium:yttrium lithium fluoride laser for open-path remote sensing of atmospheric carbon dioxide and water vapor [ D ]. South Florida University of South Florida 1996 46~ 48

[ 10 ] DOSHIDA M, TERAGUCHI K, OBARA M. Gain measurement and upconversion analysis in Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup> co-doped alumina-zirconia-fluoride glass [ J ]. IEEE JQE, 1995, 31(5): 910~ 915

[ 11 ] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. Influence of energy-transfer upconversion on the performance of high-power diode-end-pumped CW lasers [ J ]. IEEE JQE, 2000 36(5): 615~ 619

(上接第 115 页)

CuBr 蒸气激光器放电回路元件参数一种最佳搭配, 实现了一定电功率输入条件下的最大激光功率输出, 所介绍的方法可直接用于指导其它类型的卤化铜蒸气激光器放电回路的实验研究, 也可对其它科学实验过程给以有益的参考。

### 参 考 文 献

[ 1 ] LEI Sh Zh A handbook of laser technology [ M ]. Beijing Science Press 1992. 660~ 675 (in Chinese).

[ 2 ] HUANG Zh G, CHEN T, SHAN H Y. Optimization of discharge circuit elements for copper vapour lasers [ J ]. Chinese Journal of Lasers 1985 12(4): 233~ 236 (in Chinese).

[ 3 ] LITTLE C E M *et al* vapour lasers [ M ]. Chichester New York Wiley

1999 145~ 187, 223~ 232

[ 4 ] ZHAO N J, DENG G Q, ZHANG Y L. A new circuit of Ti:sapphire laser power supply [ J ]. Laser Technology, 2004 28(6): 569~ 571 (in Chinese).

[ 5 ] LIU Q, ZHU JM. Study on Ca<sup>+</sup>/CuBr self-terminating laser pulse [ J ]. Laser Technology, 2002 26(4): 290~ 294 (in Chinese).

[ 6 ] WU P, WANG Y Zh Improving on structure of the condenser of metal vapour lasers [ J ]. Laser Technology 1999 23(5): 271~ 273 (in Chinese).

[ 7 ] YING X X, XIA T J, YAO Zh X. Investigation on temperature dependence of yellow-green light pulses of CVL [ J ]. Acta Optica Sinica 1986 6(10): 870~ 874 (in Chinese).

[ 8 ] GAO Y Y. The methods of the orthonormal design of experiments [ M ]. Beijing Metallurgical Industry Press 1988 17~ 69 (in Chinese).