

激光二极管泵浦的 Nd·YVO₄ 单频绿光激光器

曹红军 张学斌 孙一民 沈乃

(中国计量科学研究院, 计量测试高技术联合实验室, 北京 100013)

杨华光

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘 要 对激光二极管泵浦单频连续运转的 Nd·YVO₄ 腔内倍频激光器进行了理论和实验研究。通过精密调控 Nd·YVO₄、KTP 及泵浦源温度以达到有关参数的最佳匹配, 从而获得了较稳定的单横模、单纵模、单偏振的绿光输出。实测最大单频绿光功率为 7.5 mW, 此时会聚泵浦光功率约为 430 mW, 已超过阈值泵浦功率 13 倍以上。

关键词 激光二极管泵浦, 短程吸收, 单频绿光。

1 引 言

激光二极管泵浦掺钕的 YAG 或 YVO₄ 激光器经倍频输出的 532 nm 绿激光在许多领域中有广泛的应用。但这种激光器通常运行于多纵模状态, 多纵模又会产生所谓“绿光问题”使倍频输出很不稳定^[1], 这在一些应用中是不允许的。激光二极管纵向泵浦的固体激光器较易实现基横模输出。现已发展了多种技术手段使其同时运行在单纵模状态(进而也消除了“绿光问题”), 如环形腔^[2]和扭摆模腔^[3]消除了空间烧孔; 双折射滤波腔^[4]引入了选择性损耗; 微片短腔增大了腔纵模间隔^[5], 这些都能不同程度地实现激光器单纵模运行。对于 Nd·YVO₄ 激光晶体, 还有一种引人注目的方法, 就是利用其对泵浦光的短程吸收(高吸收系数)特性而在驻波腔下直接获得单纵模^[6-8]。但用这一方法所能获得的单纵模输出功率与许多因素有关, 特别是在加入腔内倍频晶体后, 更需要仔细研究各种因素对单模输出功率及稳定性的影响。本文分析了有关光谱参数与腔纵模的匹配问题, 提出了激光调整中的一些基本原则, 并根据这些原则获得了最大 7.5 mW 的单频绿光输出。

2 基本原理

Nd·YVO₄ 为正单轴晶体, 在 1064 nm 处, $n_o = 1.958$, $n_e = 2.168$ 。a-切割的 Nd·YVO₄ 晶体可以很强地吸收 809 nm 附近沿 c 轴偏振的泵浦光, 在掺钕 ~ 2at.% 时, 其中心最大吸收系数为 72.4 cm^{-1} (相应的吸收深度为 0.14 mm), 这一数值约是 Nd·YAG 的 10 倍。

实验中将 Nd·YVO₄ 的一个端面作为泵浦端入射镜面。在介质有效增益带宽内, 谐振腔

内所有可能存在的纵模驻波在泵浦端镜面上有一个共同的节点, 在离镜面很近的区域内, 所有腔纵模的驻波波形基本上是空间同相的, 因而几乎都拥有相同的反转粒子数。若泵浦光在此短程内被吸收, 则具有最高受激发射截面的纵模首先起振, 使反转粒子数饱和及增益线下降, 这样就抑制了其它纵模的振荡, 使激光器运行在单纵模状态。但在逐渐远离腔镜时, 众多腔纵模的空间相位开始逐渐分离, 已振荡纵模驻波波节上的大量反转粒子数开始部分被其它纵模利用, 若泵浦能量达到一定的深度和强度, 就会使其它纵模起振。

上述原理的关键是泵浦光的短程吸收, 因而由此获得的单纵模输出是有限度的, 随着泵浦的加强, 吸收同样能量的深度必然增大, 这将不可避免地出现多纵模振荡。一般以开始出现第二个纵模时的泵浦功率与阈值泵浦功率的比值来衡量这种器件的单纵模输出能力。要想获得较大的比值数, 在调整上应遵守以下三条基本原则:

1) 泵浦光波长与 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的吸收中心重合且其偏振方向沿 c 轴。这是因为 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体在泵浦吸收中心沿 c 轴方向上有最大的吸收系数, 即对应了最短的吸收深度。泵浦光波长可通过控温系统调控, 其偏振方向沿 PN 结面。

2) $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的受激发射中心(或增益线中心)与腔内某一振荡纵模重合。这时该振荡纵模才会有最大的受激发射截面, 并与其相邻的纵模有最大的增益差。否则若该纵模偏离发射中心时, 它与一相邻腔纵模的增益差就会减小, 从而增大了出现多模振荡的可能。 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的发射中心可由温度调控; 腔纵模的频率则由腔长决定。

3) $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体的 c 轴与 KTP 晶体中快慢轴分别夹 45° 角且 KTP 晶体对起振单纵模所起的作用相当于半波片或全波片。由于 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的受激发射截面对沿 c 轴方向的偏振具有最大的值(是对沿 a 轴值的 4 倍), 因此在腔内没有倍频晶体时, 输出的 1064 nm 激光总是沿 c 轴的线偏振光。但是当需要腔内倍频时, 由于 KTP 和 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 本身都具有双折射效应, 它们的联合作用将使得腔中振荡的偏振态变得复杂^[7]。如不进行适当调控, 将会造成多纵模振荡和倍频效率降低。倍频晶体 KTP 是双轴晶体, 基频光通过它时, 分解为偏振方向相互垂直的两线偏振光慢光(s 光)和快光(f 光), 其折射率分别为 n_s 和 n_f 。腔内偏振模式的分析可以采用琼斯矩阵算法。若不考虑光的绝对相位延迟, 则 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体在 c - a 坐标(实验室坐标)系中和 KTP 晶体在 s - f 坐标系中的琼斯矩阵分别是:

$$W_1 = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_1/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_1/2) \end{bmatrix}, \quad W_2 = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_2/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_2/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta_1 = (2\pi/\lambda)(n_e - n_o)d_1$ 是 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体中非常光(e 光)和寻常光(o 光)的相对相应延迟; $\delta_2 = (2\pi/\lambda)(n_s - n_f)d_2$ 是 KTP 晶体中慢光(s 光)和快光(f 光)的相对相位延迟; λ 是振荡纵模(基频)在真空中的波长; d_1 和 d_2 分别是 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体和 KTP 晶体通光方向的长度, 从泵浦端算起, 腔内基频光一次往返的琼斯矩阵为

$$M = W_1 R(-\theta) W_2 W_2 R(\theta) W_1 \quad (2)$$

式中 θ 为 s - f 坐标系相对于 c - a 坐标系的旋转角, $R(\pm\theta)$ 是旋转变换矩阵。根据 II 类相位匹配原理, 取 $\theta = 45^\circ$ 时倍频效率最高, 这时, (2) 式的计算结果为

$$M = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta_1) \cos \delta_2 & -i \sin \delta_2 \\ -i \sin \delta_2 & \exp(i\delta_1) \cos \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过解本征方程 $MA = \zeta A$, 可以得到 M 的两个归一化且正交的本征矢量 A_1 和 A_2 , 它们代表腔内存在着两个偏振方向相互垂直的偏振模, 其在 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体中的偏振方向由 A_1 、 A_2 给

出。由于 Nd·YVO₄ 晶体的受激发射截面以及折射率对各个方向的偏振是不一样的, 若两偏振模同时振荡, 就容易产生腔纵模驻波波形的空间相位分离, 从而容易导致多纵模产生。因此, 一般希望腔内只有一个偏振模能够起振, 这可以通过使 A₁、A₂ 的偏振方向与 c 轴、a 轴重合而实现, 因为这时两偏振方向上的发射截面之差最大, 使沿 a 轴偏振的振荡实际上几乎不能产生, 这就要求 M 为对角矩阵, 即 δ₂ 为 π 的整数倍, 这可以通过对 KTP 控温(调控 n_s、n_f 和 d₂) 而实现。如图 1 所示, 这时 KTP 的作用相当于半波片或全波片, Nd·YVO₄ 发出的沿 c 轴偏振的基频光通过 KTP 后偏振方向旋转 90°(半波片)或方向不变(全波片), 基频光经镜面反射再次通过 KTP 后, 返回 Nd·YVO₄ 的光总是沿 c 轴偏振的。由 KTP 晶体的 II 类相位匹配原理, 532 nm 倍频光沿 f 轴方向偏振。

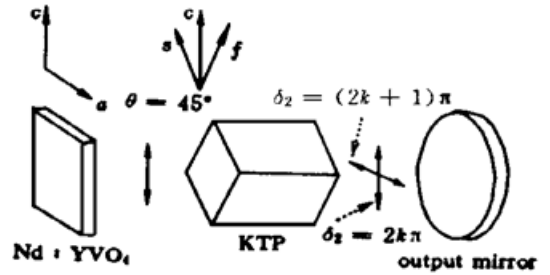


Fig. 1 Schematic illustration of the polarization modes in the cavity when $\theta = 45^\circ$ and $\delta_2 = (2k + 1)\pi$ or $2k\pi(k = 0, 1, 2 \dots)$

3 实验结果

实验装置如图 2 所示。泵浦源为国产激光二极管, 通过控温使其波长稳定在 Nd·YVO₄ 的吸收峰上(约 808.7 nm): 并使其 PN 结面与 Nd·YVO₄ 的 c 轴平行。泵浦光经光学系统整形聚焦后会聚到光腔的 TEM₀₀模体积, 经微调输出镜得到 TEM₀₀模。

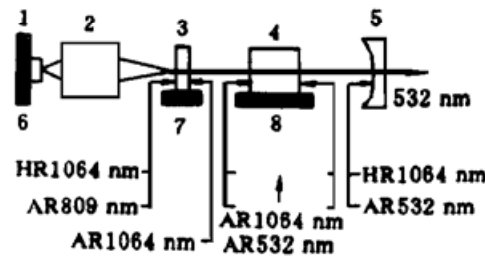


Fig. 2 Schematic of the diode-pumped, single-frequency, intracavity-doubled Nd·YVO₄ laser. 1: diode laser, 2: coupling optics, 3: Nd·YVO₄, 4: KTP, 5: output mirror, 6, 7, 8: temperature controllers

激光谐振腔由 3 mm × 3 mm × 0.5 mm 的 Nd·YVO₄ 晶体(通光方向 0.5 mm, a-切割, 掺 Nd~2at.%)、3 mm × 3 mm × 5 mm 的 KTP 晶体(通光方向 5 mm, II类相位匹配切割)及曲率半径为 100 mm 的输出镜组成, 它们均固定在同一般钢支架上; 几何腔长约为 13 mm; 各通光面镀膜情况已标于图 2 中。

用自由光谱范围为 4 GHz 的共焦扫描干涉仪观测 532 nm 激光输出的模式, 并随时用滤光板、偏振棱镜、分束棱镜及功率计等检测基频和倍频输出的能量大小

和偏振特性。实验结果如下:

- 1) 阈值泵浦功率约为 30 mW。
- 2) 在不加控温措施时, 输出绿光在低泵浦强度下为单纵模, 但随着泵浦加强, 在绿光功率约为 1 mW 时开始出现第二个纵模。
- 3) 对激光二极管, KTP 和 Nd·YVO₄ 进行控温。首先使泵浦光波长接近 Nd·YVO₄ 的吸收峰, 这时应有较大的泵浦效率; 再反复仔细地调节各个温度, 同时监测基频输出的两个方向上的偏振分量及倍频输出的模式, 直到模式为单纵模、基频光几乎完全沿 a 轴或 c 轴偏振(实验中沿 c 轴偏振)且倍频输出效率尽可能高时, 就可以认为已近似达到了理想状态。这时输出的倍频绿光功率比同样泵浦强度下的多模光功率要强, 并且单频绿光的偏振方向沿 f 轴, 即与 c 轴成 45°角, 与 II类相位匹配的倍频理论相符。
- 4) 在不同的泵浦强度及腔内功率密度下, Nd·YVO₄ 的光学长度及发射中心对应的频率

是不同的(尽管有控温,但 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体总存在一个温度梯度及热平衡态)。因此,泵浦光功率只有在一定范围内改变时,才能保持已调整好的单纵模稳定状态;大范围改变泵浦功率时,将出现两纵模或多纵模振荡,这时又需要在新的泵浦功率下重新进行仔细的调整,而且随着泵浦功率的提高,获得单纵模输出所需要的调整精度也要求越来越高。实验中在会聚泵浦光功率升到 430 mW 时,测到了 7.5 mW 的单纵模输出。但此时器件对环境温度、气流及振动所产生的扰动非常敏感,易发生跳模现象和出现多纵模。继续增大泵浦功率时,激光器开始多纵模运行,但仍能保持基横模。图 3 所示为单模和多模工作时扫描干涉仪输出信号在示波器上的照片。图 4 给出了在不同的泵浦光功率下得到的单频绿光输出功率。

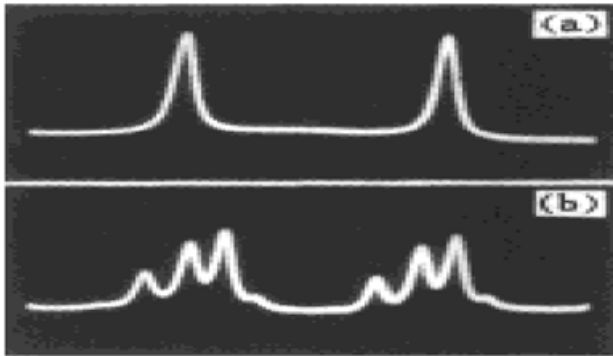


Fig. 3 Optical spectrum of the diode laser-pumped intracavity-doubled $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ laser measured by a scanning confocal interferometer with 4 GHz free spectral range. (a) Single-mode, (b) Multi-modes

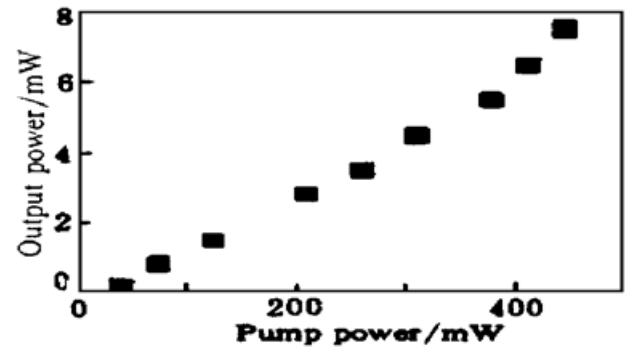


Fig. 4 532 nm single-frequency output power versus pump power

4 讨 论

基本原理一节中提出的三条调整原则对获得较高功率的单频绿光及稳定的单模运转极为关键,但在实际操作中又很难达到完全理想的状态。1) $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体的热稳定性较差(导热性差),且 n_e 和 n_o 都随温度而变,泵浦光打在其上的强弱以及腔内功率密度的变化都会明显影响其光学长度,从而造成腔纵模漂移;2) 尽管 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 的发射中心频率可以由温度调控,但温度调控本身又影响了其光学长度;3) KTP 的半波片或全波片作用是针对起振单纵模的,要通过调控其温度而得到合适的 δ_2 值,这时温度的变化又不可避免地要引起腔纵模漂移。可见, $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 和 KTP 的温度以及泵浦强度总是相互制约的,在调整中只可能近似达到理想匹配。

绿光单频输出的模式稳定性与激光器的机械稳定性(包括环境状况)、晶体的控温稳定性以及泵浦强度这三个因素密切相关。本文激光器对激光二极管、 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 和 KTP 的控温已达到了较高的稳定度,通过监测稳态时热敏电阻(MF5E-10 高精度热敏电阻)两端电压可估算出控温稳定度在数小时内能保持在 0.01°C 的量级,这已能保证在中小功率时激光器较为稳定的单模运转;在机械设计上由于存在一些悬臂结构,使稳定性受到了一定影响,实验中随着泵浦强度的增大,模式逐渐变得不稳。

目前国际上用来研制 532 nm 碘稳定固体激光频标所采用的光源均以 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 作为激光介质。但由于 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体具有高增益、宽吸收带、低阈值等优点,作者认为这种激光器

在作为次级应用频标的研究中还是大有前途的。

最近, 激光器的性能已获得很大改进: 1) 改用 3at. % 掺杂的 Nd·YVO₄, 进一步增大了吸收系数, 减小了吸收深度; 2) 设计上消除了机械上的悬臂结构; 3) 进一步提高了控温精度。目前这台激光器已能相当稳定地输出 20 mW 单频绿光, 并且作者已能将这台激光器的频率连续 4 小时锁定在碘分子 532 nm 附近的多普勒加宽吸收线上, 这说明该器件已初步达到了作为次级碘稳定频标的要求。

参 考 文 献

- [1] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd·YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(9) : 1175~ 1180
- [2] T. J. Kane, R. L. Byer, Monolithic, unidirectional single-mode Nd·YAG ring laser. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2) : 65~ 67
- [3] 林月明, 何慧娟, 陆雨田, 激光二极管泵浦单频连续工作的 Nd·YAG 激光器. *光学学报*, 1994, **14**(8) : 891~ 893
- [4] 曹红军, 张学斌, 孙一民等, LD 抽运的 NdAG 单频倍频激光器. *中国激光*, 1997, **A24**(10) : 881~ 885
- [5] J. J. Zayhowski, A. Mooradian, Single-frequency microchip Nd lasers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1) : 24 ~ 26
- [6] G. J. Kintz, T. Baer, Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(9) : 1457~ 1459
- [7] S. Helmfrid, K. Tatsuno, Stable single-mode operation of intracavity-doubled diode-pumped Nd·YVO₄ lasers: theoretical study. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(3) : 436~ 445
- [8] 张宽收, 李瑞宁, 谢常德等, 全固体化 Nd·YVO₄ 单频绿光激光器. *中国激光*, 1994, **A21**(8) : 617~ 620

Single-Frequency Operation of a Diode-Pumped Nd·YVO₄ Green Laser

Cao Hongjun Zhang Xuebin Sun Yimin Shen Naicheng

(Joint Laboratory of Advanced Technology in Measurements, National Institute of Metrology, Beijing 100013)

Yang Huaguang

(Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 26 July 1996; revised 11 August 1997)

Abstract A diode-pumped single-frequency intracavity-doubled CW laser has been demonstrated by optimizing several spectroscopic parameters and cavity length with precise temperature controlling of the Nd·YVO₄, KTP and diode laser. Stable single-mode output power of 7.5 mW for the green light was obtained when the incident pump power was 430 mW which is 13 times greater than the threshold.

Key words diode laser pumping, short absorption depth, single-frequency green laser.