

LD 泵浦的全固态内腔倍频单模绿光激光器的研究

孙孝冬¹, 刘 敏², 张 勇^{3,4}, 姚建铨⁴

(1. 河北职工医学院 物理教研室, 河北 保定 071000; 2. 唐山学院 基础课部, 河北 唐山 063000; 3. 河北工业大学 理学院, 天津 300130; 4. 天津大学 精仪学院, 天津 300072)

摘要: 研究了激光二极管(LD)端面泵浦的全固态内腔倍频的单模运转的532nm绿光激光器的腔型设计, 以及获得最大输出功率的简单理论. 并用LD泵浦的Nd:YAG内腔倍频激光器从实验上进行了验证. 为进一步进行自混合干涉实验奠定了基础.

关键词: LD端面泵浦; 单模; 全固态内腔倍频; 自混合干涉

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

Study on LD Pumped All-solid-state Inner Cavity Frequency-doubled Single-mode Green Laser

SUN Xiao-dong¹, LIU Min², ZHANG Yong^{3,4}, YAO Jian-quan⁴

(1. Physics Teaching Section, Hebei Medical College for Continuing Education, Hebei Baoding 071000, China; 2. Department of Foundational Teaching, Tangshan College, Hebei Tangshan 063000, China; 3. School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 4. College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on rate equations, we designed the cavity of LD pumped all-solid-state inner cavity frequency-doubled single-mode green laser (532nm). Educated the basic theory of obtaining the maximal output power of the laser. And validated using LD pumped Nd:YAG inner cavity frequency-doubled laser experimentally. The conclusions and the sample laser provided an experimental basic for self-mixing interference effect in LD pumped single-mode green laser.

Key words: LD side-pumped; single-mode; all-solid-state inner-cavity frequency-doubled; self-mixing interference

0 引言

小型化、全固态、高效率的单模连续运转的中小功率的蓝、绿激光器在光学数据存储、相干光通讯以及新型的测量系统等领域有着广泛的应用前景. 尤其是LD泵浦的内腔倍频蓝、绿激光器更是以其结构紧凑、鲁棒、性能稳定而倍受青睐. 近几年关于这方面的研究很多^[1-6], 主要限于实验现象观察, 但是在理论上对最大泵浦功率等物理量的定量研究尚不多见. 本文从速率方程出发, 导出了单模运转时最大泵浦功率和腔参数之间的函数关系, 并能对前人的工作进行定量分析.

1 LD 泵浦的内腔倍频激光器单模连续运转的理论分析

对于连续运转的内腔倍频激光器, 考虑到泵浦光与腔内激光强度在增益介质中随空间位置的变化, 假定只有第*i*个纵模起振, 内腔倍频激光器, 对于理想的四能级系统, 速率方程可写成如下形式^[7]:

$$\frac{dn(x, y, z, t)}{dt} = q(x, y, z) - \frac{n(x, y, z, t)}{\tau_f} - \frac{cn(x, y, z, t)}{n_s} \sigma_i \phi_i(x, y, z) \quad (1)$$

收稿日期: 2004-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60278001)

作者简介: 孙孝冬(1971-), 男(汉族), 讲师.

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = \frac{c\sigma_i}{n_s} \iiint_{\Omega} n(x, y, z) \varphi_i(x, y, z) dV - \frac{\Phi_i}{\tau_c} \delta_i \quad (2)$$

其中: $n(x, y, z, t)$ 为有源区反转粒子数密度; $q(x, y, z)$ 为单位时间抽运到激光上能级的粒子数密度, 也就是单位体积的泵浦速率; $\varphi_i(x, y, z)$ 为第 i 个纵模的光子数密度, 积分后 Φ_i 为第 i 个纵模腔内振荡光子总数; τ_f 为激光介质的荧光寿命; n_s 为有源区折射率; σ_i 为的受激发射截面; τ_c 为光在腔内往返一次所需时间; δ_i 为第 i 个纵模的往返损耗; c 为真空中的光速.

为简单起见, 假设: 光子数密度的横向场分布可以用等效模截面 A_s 归一化; 泵浦光全部落在振荡模体积内; 泵浦光及振荡光均为平面简谐波. 则谐振腔内的光子数密度只是纵坐标 z 的函数, 激光介质内第 i 个纵模的光子数密度可写成

$$\varphi_i(x, y, z) = \frac{\Phi_i}{A_s L} n_s [1 - \cos(2k_i z + \psi_i)] \quad (3)$$

激光器 TEM₀₀ 模运转时, $A_s = \pi \omega_s^2 / 2$, L 为腔的光学长度, k_i 为第 i 个纵模的波矢, ψ_i 是由边界条件决定的初位相, 由边界条件, 在腔镜处光场为零, 所以 $\psi_i = 0$, 于是式 (3) 可简化为

$$\varphi_i(x, y, z) = \frac{\Phi_i}{A_s L} n_s [1 - \cos(2k_i z)] \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1) 和式 (2), 从而得到

$$\frac{dn(x, y, z)}{dt} = q(x, y, z) - \frac{n(x, y, z)}{\tau_f} - \frac{cn(x, y, z)}{A_s L} \sigma_i \Phi_i [1 - \cos(2k_i z)] \quad (5)$$

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = \frac{c\sigma_i}{A_s L} \Phi_i \int_0^L \int_S \frac{\Phi_i}{A_s L} n(x, y, z) [1 - \cos(2k_i z)] dS dz - \frac{\Phi_i}{\tau_c} \delta_i \quad (6)$$

这里, S 表示对腔的横截面积分.

对于激光光斑为圆形光斑的激光器, 设长度为 l 的增益介质对泵浦光的吸收系数为 α_q , 总泵浦速率为 Q , 则速率方程组 (5)、(6) 可改写为:

$$\frac{dN(z)}{dt} = \frac{\alpha_q Q \exp(-\alpha_q z)}{1 - \exp(-\alpha_q l)} - \frac{N(z)}{\tau_f} - \frac{cN(z)}{A_s L} \sigma_i \Phi_i [1 - \cos(2k_i z)] \quad (7)$$

$$\frac{d\Phi_i}{dt} = \frac{c\sigma_i}{A_s L} \Phi_i \int_0^l N(z) [1 - \cos(2k_i z)] dS dz - \frac{\Phi_i}{\tau_c} \delta_i \quad (8)$$

其中 $N(z) = \iint_S n(x, y, z) dS$ 为反转粒子数的线密度. 将 Φ_i 表示成腔内光强 I_i 的形式

$$I_i = \frac{c\Phi_i h\nu_i}{2LA_s} \text{, 并记作 } C_2 = \frac{\alpha_q Q h\nu_i}{1 - \exp(-\alpha_q l) A_s} = \frac{\alpha_q P_{in}}{A_s} \quad (9)$$

式中 P_{in} 为进入谐振腔的泵浦光功率. 腔内的反转粒子数密度以 J/m^3 为单位 $n(z) = \frac{h\nu_i}{A_s} N(z)$, 则 (7)、(8) 两式可简化为:

$$\frac{dN(z)}{dt} = C_2 \exp(-\alpha_q z) - \frac{N(z)}{\tau_f} - \frac{2\sigma_i}{h\nu_i} I_i n(z) (1 - \cos 2k_i z) \quad (10)$$

$$\frac{dI_i}{dt} = \left[\frac{2\sigma_i}{h\nu_i} \int_0^l N(z) (1 - \cos 2k_i z) dz - \delta_i \right] \frac{I_i}{\tau_i} \quad (11)$$

因此, 第 i 个纵模的增益为 $G_i = \frac{2\sigma_i}{h\nu_i} \int_0^l n(z) (1 - \cos 2k_i z) dz$, 又根据速率方程可得单频运转的泵浦阈值为

$$P_{in} = \frac{I_{sat,i} \delta_i \alpha_q}{2C_2 [1 - \exp(-\alpha_q l)]} P_{in} \quad (12)$$

其中 $I_{sat,i} = \frac{h\nu_i}{\sigma_i \tau_f}$ 为饱和光强. 在泵浦功率一定且稳定运转时, $\frac{dN(z)}{dt} = \frac{dI_i}{dt} = 0$, 由 (10)、(11) 两式得:

$$n(z) = \frac{\tau_f C_0 \exp(-\alpha_q z)}{1 + I_i^* (1 - \cos 2k_i z)} \quad (13)$$

$$G_i = \frac{2\sigma_i}{h\nu_i} \int_0^l n(z) (1 - \cos 2k_i z) dz \quad (14)$$

式 (13) 中 $I_i^* = \frac{I_i}{I_{sat,i}}$ 为归一化强度. 采用非线性近似, 假设 $I_i \ll I_{sat,i}$, 则反转粒子数 $n(z)$ 可近似表达为:

$$n(z) = \tau_f C_0 \exp(-\alpha_q z) [1 - 2I_i^* (1 - \cos 2k_i z)] \quad (13a)$$

实现单模运转时, 除第 i 个纵模的增益大于损耗外, 其余任何纵模的增益都小于损耗, 所以有:

$$\int_0^l n(z) [\cos 2k_{j \neq i} z - \cos 2k_i z] dz < \frac{h\nu_j \delta_j}{2\sigma_j} - \frac{h\nu_i \delta_i}{2\sigma_i} \quad (15)$$

假定纵模序数 $i, j \ll 1$, 把式 (13a) 代入式 (15), 得到

$$I_i^* < \frac{\alpha_i}{2\tau_f C_0} \left(\frac{h\nu_j \delta_j}{\sigma_j} - \frac{h\nu_i \delta_i}{\sigma_i} \right) \left\{ 1 - \alpha_i \int_0^l \exp(-\alpha_q z) \cos[2(k_j - k_i)z] dz \right\}^{-1} \quad (16)$$

令 $\beta_{ij} = \frac{\sigma_i \delta_j}{\sigma_j \delta_i}$, 对于均匀加宽的激光介质, 假定激光腔内没有其它选模元件, $\delta_i \approx \delta_j$, 所以 $\beta_{ij} = 1 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_{half}} \right)^2$ 只是受激发射截面的函数, 其中 $\Delta\lambda$ 为第 i 个纵模与可能起振的第 j 个纵模的波长差, $\Delta\lambda_{half}$ 为线型的半宽度 (FWHM). 利用式 (12) 及, 式 (16) 可简化为

$$P_{in} < \{ 1 + [3(\beta_{ij} - 1)/2(1 - \alpha_i \psi_{ji})] \} P_{th} \quad (17)$$

其中, $\psi_{ji} = \int_0^l \exp(-\alpha_q z) \cos[2(k_j - k_i)z] dz$. 式 (17) 就是连续激光器单模运转的理论判据.

2 实验验证

实验中, 用布氏板实现了 LD 泵浦的 Nd:YAG/KTP 内腔倍频激光器的单模运转, 实验装置如图 1 所示. 从式 (17) 可看出, 对各向同性激光介质, 靠改变损耗就很容易实现单模运转. 布氏板与 KTP 一起构成 Lott 滤光器以实现损耗调制.

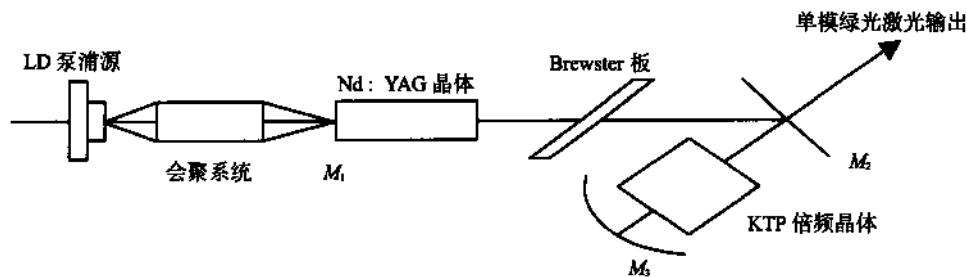


图 1 用布氏板实现 LD 泵浦的 Nd:YAG/KTP 内腔倍频激光器单模运转的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for LD pumped Nd:YAG/KTP intra-cavity double frequency single mode green laser using Brewster plate

以激光器输入端为参考面, 倍频效率最高时, 腔内往返琼斯矩阵为 $M = \begin{bmatrix} q^4 \cos \delta & iq^2 \sin \delta \\ iq^2 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}$, 其中 $q = \frac{2n}{n^2 + 1}$, n 为布氏板的折射率, δ 为倍频晶体产生的相位延迟. M 的本征值为 $\xi = \frac{(1+q^4) \pm \sqrt{(1-q^4)^2 \cos^2 \delta - 4q^4}}{2}$, 布氏板对起振偏振模产生的损耗为 $\Delta = 1 - \kappa \xi \kappa^2$, 由此可知某一纵模满足 δ 为 π 的整数倍时, p 方向的本征偏振态的损耗为零, 优先起振. 假定 Nd:YAG/KTP 内腔倍频激光器的几何长度为 25 mm, 布氏

板折射率 $n=1.45$, 板厚 0.5 mm , $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体长 3 mm , 吸收系数和荧光寿命分别为 4.9 cm^{-1} 和 $230\text{ }\mu\text{s}$, KTP 晶体长 5 mm , 则谐振腔的光学长度为 $L=33.4\text{ mm}$, 振荡纵模与相邻可能起振的纵模之间的相位延迟由 $\Delta\delta=\frac{\pi\Delta n d}{L}$ 决定 . 式中 Δn 和 d 分别为 KTP 的双折射率和长度 , 可算得 $\Delta\delta=0.427\text{ rad}$, 损耗差为 $\Delta=1-\kappa\zeta\kappa^2=0.014$. 取 KTP 晶体产生的线性损耗为 0.095 , 腔内其它损耗为 0.06 , 利用上述激光器参数获得该激光器单模运转的泵浦功率为 $P_{in}<4.8P_{th}$. 实验中用扫描干涉仪和功率计分别对激光输出进行了模式和功率测量 , 单模输出时 , 由于泵浦功率较低 , 因此获得的单模绿光输出功率很低 , 仅为毫瓦级 . 但对于自混合干涉已经足够了 , 而且对环境温度、机械结构稳定性要求不高 , 容易实现单模运转 . 下表中给出不同泵浦电流下 , 绿光输出功率 . LD 工作电流不超过 1 A 培 .

表 1 不同泵浦电流下的输出功率

Tab. 1 Output power under different pumped current

泵浦电流 / A	绿光输出功率 / mW
0.610	1
0.732	5
0.882	10
1.000	13

参考文献 :

- [1] Kintz G J , Beer T . Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths [J] . IEEE J Q E , 1990 , QE-26 (9) : 1 457-1 459 .
- [2] Oka M , Kubota S . Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser [J] . Opt Lett , 1988 , 13 (4) : 805-807 .
- [3] Harrison J , Finch A . Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser [J] . IEEE J Q E , 1992 , QE-28 (4) : 1 123-1 130 .
- [4] Fan T Y . Single-axial mode intracavity doubled $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser [J] . IEEE J Q E , 1991 , QE-27 (9) : 2 091-2 093 .
- [5] Draegert D . Efficient single-longitudinal-mode $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser [J] . IEEE J Q E , 1972 , QE-8 (1) : 235-239 .
- [6] Nagai H , Kume M . Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser using a Brewster plate [J] . IEEE J Q E , 1992 , QE-28 (4) : 1 164-1 168 .
- [7] Fan T Y , Byer R L . Diode laser-pumped solid-state lasers [J] . IEEE J Q E , 1988 QE-24 (6) : 895-912 .