

文章编号:1001-5078(2002)06-0371-03

二极管泵浦内腔倍频激光技术研究进展

王鹏飞, 吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064)

摘要:评述了二极管泵浦内腔倍频激光技术的发展现状,对解决中小功率下‘绿光问题’的理论及实验方案进行了比较分析,对高功率内腔倍频系统亦进行了初步探讨。

关键词:内腔倍频激光器;绿光问题;Jones 矩阵;耦合波方程

中图分类号:TN248.1+3

文献标识码:A

Recent Advances in Diode – pumped Intracavity – frequency – doubled Laser Technology

WANG Peng-fei, LÜ Bai-da

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract:Recent developments in diode-pumped intracavity-frequency-doubled laser technology are reviewed. The theoretical and experimental results in solving the ‘green problem’ at lower output power are analyzed and compared. The intracavity-frequency-doubled laser system and technology at high output power are discussed.

Key words:intracavity-frequency-doubled laser; green problem; Jones matrix; coupling wave equation

1 引言

二极管泵浦内腔倍频激光器是一种非常有用的可见激光光源,在诸如光存储、水下通信、精密测量以及激光医疗等许多领域都有广泛的应用,相对于腔外倍频激光器其显著优点在于高的谐波转换效率,但源于纵模和频以及交叉饱和效应的所谓‘绿光问题’^[1]一直限制着它的应用。随着非线性光学晶体如 KTP、LBO 的研制成功和二极管泵浦技术的发展,二极管泵浦内腔倍频激光技术的研究获得显著进展,已经获得平均功率超过 100W^[2]的调 Q 绿光输出。

中小功率内腔倍频激光系统常采用线性腔,较高功率则常采用折叠腔,欲获得单纵模运行一般采用环形腔。下面从理论和实验方面对近年来二极管泵浦内腔倍频激光技术的若干进展进行分析。

2 理论分析

Jones 矩阵法和耦合波方程是研究内腔倍频的重要方法,前者用于分析腔内的偏振态,后者则用于描述腔内纵模强度和增益的变化。

2.1 Jones 矩阵法

以图 1 所示线性腔 – 内腔倍频系统为例进行分析。设晶体 C1、C2 的单程相位延迟分别为 δ_1 、 δ_2 ,快轴夹角 φ ,以 A 为参考往返一周 Jones 矩阵为

$$M_r = J(\delta_1)R(\varphi)J(\delta_2)J(\delta_2)R(-\varphi)J(\delta_1) \quad (1)$$

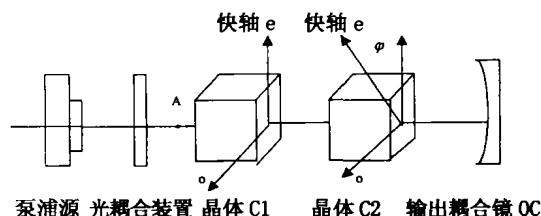


图1 线性腔 – 内腔倍频系统

其中 $\delta_i = \frac{n_{ei} - n_{oi}}{k\ell_i}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, n_e 、 n_o 为晶体 e、o 光轴上的折射率, ℓ_i 为晶体的长度, λ 为基波波长 ($i = 1, 2$)。

$J(\delta_i) = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_i/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta_i/2) \end{bmatrix}$ 为描述对光束

具有 δ_i 相位延迟晶体的偏振矩阵, $R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵。由 $M_r E_i = \lambda_i E_i$ ($i = 1, 2$) 可得到体征向量

$$E_1(\omega_1) = \Delta_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, E_2(\omega_2) = \Delta_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

基金项目:本课题受华北光电所科技重点实验室基金和国家高技术基金资助。

作者简介:王鹏飞(1977-),男,硕士研究生,主要从事高功率激光技术的研究。

收稿日期:2002-05-08

式中相关参数为:

$$\begin{aligned} x_1 &= (b+s)/Z, y_1 = d/Z, \\ x_2 &= d/Z, y_2 = -(b+s)/Z \\ a &= \cos^2 \varphi \cos(\delta_1 + \delta_2) + \sin^2 \varphi \cos(\delta_1 - \delta_2) \\ b &= \cos^2 \varphi \sin(\delta_1 + \delta_2) - \sin^2 \varphi \sin(\delta_2 - \delta_1) \end{aligned} \quad (3)$$

$$d = \sin(2\varphi) \sin \delta_2, s = \sqrt{b^2 + d^2}, Z = \sqrt{d^2 + (s+b)^2}$$

$$\Delta_1 = A_1 \exp[i(\omega_1 t + \phi_1)], \Delta_2 = B_2 \exp[i(\omega_2 t + \phi_2)]$$

其中 ϕ_1, ϕ_2 是任意相移, A_1, B_2 是基波场振幅, 显然 $E_1(\omega_1)$ 与 $E_2(\omega_2)$ 是彼此正交的, 这意味着腔内存在的本征模分布在彼此正交的两个偏振方向上。设在这两个方向上分别有 M, N 个纵模, 则:

$$E_0 = x_1 \sum_{j=1}^M \Delta_{1j} + x_2 \sum_{j=1}^N \Delta_{2j}, E_e = y_1 \sum_{j=1}^M \Delta_{1j} + y_2 \sum_{j=1}^N \Delta_{2j} \quad (4)$$

以 II 类相位匹配为例, 基波的非线性极化场为:

$$P(\omega_1 + \omega_2) = d_{eff} E_0(\omega_1, \omega_2) E_e(\omega_1, \omega_2) \quad (5)$$

d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数。由 $I(\omega_1 + \omega_2) = \langle P(\omega_1 + \omega_2) P^*(\omega_1 + \omega_2) \rangle$ 不难得出

$$I = (d_{eff}^2/4) [g(\sum_i \bar{I}_i^2 + 2 \sum_{i \neq l}^{MM} I_i I_l + \sum_k \bar{J}_k^2 + 2 \sum_{k \neq l}^{NN} J_k J_l) + 4(1-g) \sum_{kl}^{MN} I_i J_k] \quad (6)$$

$\langle \rangle$ 代表系综平均, $*$ 代表共轭, (6) 式右边第 1、3 项代表纵模的 SHG (倍频产生), 第 2、4 项代表偏振平行纵模间的 SFG (和频产生), 第 5 项代表偏振正交纵模间的 SFG。其中:

$$g = (d/s)^2 \quad (7)$$

称之为倍频参数。

SFG 是导致‘绿光问题’的非线性源^[1], 消绿光波动的条件就是 (6) 式中表征 SFG 的项为 0, 可以看出 $g=1$ 正是有效消除正交纵模之间的 SFG 且获得最有效 SHG 的条件, 但是表征平行纵模 SFG 的第 2、4 项却没办法消除。由 $g=1$ 导出 $b=0$, 即:

$$\cos^2 \varphi \sin(\delta_1 + \delta_2) - \sin^2 \varphi \sin(\delta_2 - \delta_1) = 0 \quad (8)$$

由此得到典型的消 SFG 腔配置为: 1). 在腔内插入一块主轴与倍频晶体主轴夹 45 度角的基波 QWP 片 (基波 $\frac{\lambda}{4}$ 波片); 2). 腔内放置两块主轴交 90 角度的相同倍频晶体 (交叉双倍频晶体)。

李德华等用 DWP (双波片) 模型^[3] 对直线腔中的偏振调制^[1,4,6] 作了推广, 对 I 类和 II 类相位匹配情况分别推导出了消 SFG 条件, 实验验证了理论结果。

2.2 内腔倍频耦合波方程

方程的一般形式如下:

$$\tau_c \frac{dI_k}{dt} = (G_k - \delta_k - g f \varepsilon I_k - 2 f \varepsilon \sum_{j=1, j \neq k}^M \eta_{kj} I_j) I_k \quad (9)$$

$$\tau_f \frac{dG_k}{dt} = G_{0k} - (1 + \beta I_k + \sum_{j=1, j \neq k}^M \beta_{kj} I_j) G_k$$

式中 M 代表腔内纵模数, 谐波输出由 (6) 表征,

其余参数意义如下: τ_c, τ_f 为腔往返寿命、增益晶体荧光寿命, β, β_{kj} 为自饱和系数、第 k, j 纵模间的交叉饱和系数, G_{0k}, G_k 为第 k 纵模的小信号增益、瞬时增益, I_k 为第 k 纵模的强度, ε 为倍频晶体的非线性系数, g, η_{kj} 为倍频参数、和频参数 (由具体腔参数决定), 两纵模平行: $\eta_{kj} = (g/2)(1 + \cos \theta)$, 两纵模垂直: $\eta_{kj} = 1 - (g/2)(1 + \cos \theta)$, 其中 θ 为两相互作用纵模的椭圆率之差。 $f = \frac{W_s^2}{W_d^2}$, W_s, W_d 为基波光束在增

益晶体、倍频晶体上的光斑半径, 也是依赖于具体腔参数的量, 在许多利用耦合波方程讨论绿光问题的文献中其取值都为 1^[1,3], 实际上对于不同的腔其值是有差别的, 文献 [5] 的折叠腔中 $f \approx 5184$ (增益晶体上的基模光斑尺寸约为 1.8mm, 倍频晶体上的基模光斑尺寸约为 25 μ m), 线性腔中由于两块晶体一般放置的较近有 $f \approx 1$ 。

利用 Jones 矩阵和耦合波方程原则上可对给定内腔倍频系统的动态过程作出解释。Baer 首次提出了内腔倍频耦合波方程^[1] 并利用它对腔内的相关过程进行了研究, 分析两纵模情况, 预言了两个纵模彼此异相的脉冲状态, 分析了纵模情况, 预言了与实验结果较好吻合的无规则振荡。Oka 等人首先指出在 Baer 的理论中忽略了基波和二次谐波的偏振^[6], (9) 式就是考虑到纵模偏振后的耦合波方程形式。考虑到纵模偏振, Ustyugov 等利用 Jones 矩阵法和耦合波方程分析了一个折叠腔-内腔倍频系统的纵模动态过程, 从理论上预言了所谓的‘反相效应’和‘群集效应’, 并得到与理论吻合很好的实验结果^[9]。

3 中小功率内腔倍频激光系统的实验分析

中小功率系统中采用较多的是线性腔和环形腔, 目前对‘绿光问题’的研究也主要集中在这种情况^[1,4,6,7]。线性腔具有调整方便、稳定、结构简单和便于形成整机等优点, 其缺点在于腔镜的失调会导致输出光束质量的严重下降; 单向环型腔常常用来产生数毫瓦的腔内倍频绿光, 是一种在期望获得小功率、单纵模激光时可采用的腔型。

在线性腔中一般利用交叉双倍频晶体法或基波 QWP 片法解决‘绿光问题’, 不采取特殊的措施激光器一般运行在多个纵模上, Gaebler 等利用交叉双倍频晶体法, 在 1W 的二极管泵浦功率下获得了 30mW、强度噪声小于 2% 的连续蓝光输出, 当将第二块倍频晶体用基波的全反射镜代替后, 获得约 20mW 的连续蓝光输出, 但观察到了明显的强度波动^[4]。强制激光器单纵模运行也可以有效解决‘绿光问题’, 驻波腔中的单纵模运行可以通过在腔内引入一个双折射滤光片来获得, 双折射滤光片可以由切割成布儒斯特角的增益晶体和一个 KTP 晶体构成^[7], 也可以在腔内另插入一块布儒斯特片与

KTP 构成,为防止多模振荡需要严格控制温度等相关参数。当采用 LBO 倍频时,还可以利用 LBO 的 NCPM (I 类温度调谐非临界相位匹配) 性质将 LBO 倾斜放置来抑制绿光波动,倾斜放置克服了由 LBO 表面残余反射引起的标准具效应,使腔内的纵模数增多,而激光稳定性是随纵模数以及腔内往返时间的增加而增加的,因此倾斜的 LBO 增加了系统稳定性^[5]。

4 高平均功率、高重复率内腔倍频激光系统实验分析

高功率系统中采用较多的是 V、Z 型的折叠腔, Nd:YAG 目前仍然是高平均功率二极管泵浦内腔倍频的首选晶体,最常用的倍频晶体是 KTP 和 LBO。目前已经获得超过 100W^[2] 的平均绿光输出。

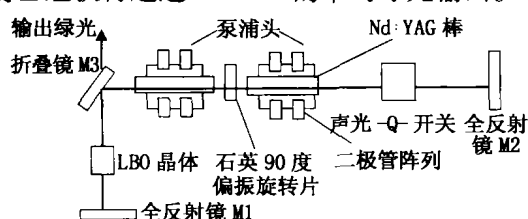


图2 高功率调Q二极管泵浦内腔倍频系统

下面以图2所示系统^[2]为例来分析高功率内腔倍频激光系统的实验方案。实验采用折叠腔, LBO II类相位匹配,折叠镜 M3 为平面镜(在 532nm 处的透射率 $T > 98\%$, 在 1064nm 处的反射率 $R > 99.5\%$), M1 和 M2 是曲率半径为 1m 的全反射镜, YAG 棒直径 4mm、长 105mm, M2 到 YAG 棒端距离为 250mm,腔长 700mm,采用双折射补偿、二极管漫反射紧密耦合侧泵浦和双棒串接方式,在 10kHz 的重复频率下获 138W、光束质量因子 $M^2 = 11$ 、亮度超过 434MW/cm²·sr 的绿光输出。采用折叠腔是因为这种腔型具有失调灵敏度低、利于系统稳定运行、可分别调整各个腔臂腔参数等优点。固体激光材料的热畸变是高功率下光束质量退化的主要原因,为了提高功率的同时保持较好的光束质量,需要尽量减少热畸变的影响,采用板条状介质是个可行的方法,但需要比较昂贵的板条增益材料,而且由于板条的形状特点,比较难以产生精密材料处理中所要求的对称性很好的光束,因此这里采用两条棒状介质串接,利用加在两棒之间的石英 90 度偏振旋转片补偿两棒的热畸变。采用侧泵浦是因为这种泵浦方式容易定标放大到更高功率,但侧泵浦一般来说较端泵浦的效率低,二极管漫反射紧密耦合侧泵浦就是为了克服侧泵浦这一缺点而发展起来的一种泵浦耦合方式,此外这种泵浦方式还能够在增益晶体棒的横截面内获得均匀的泵浦光。实验中没有提及到绿光问题及其解决措施,估计长腔对解决绿光问题起了较大的作用。文献[8]采用 Z 型折叠腔、KTP II 类相位匹配,在谐波输出镜和激光模块之间插入基波

的 QWP 片来克服绿光问题,获得 27W、 $M^2 = 8$ 的连续绿光输出,TEM₀₀模运行时获得 16W、 $M^2 = 1.2$ 的绿光输出。

在高功率的二极管泵浦内腔倍频激光系统设计中,为了控制光束质量要考虑的中心问题仍然是系统的热效应。作为在钛蓝宝石激光器的泵浦光源、精密材料处理以及有效四波混频中的应用,所要求的技术指标是:在 10kHz 的重复频率下,获得 $M^2 < 20$ 、100W 的绿光输出,电光效率大于 7%^[2]。高功率、高重复率二极管泵浦内腔倍频系统对‘绿光问题’的研究很少报导,亦缺少更多的实验数据。

5 小结

已有理论和实验结果均表明,采用合适的谐振腔及泵浦方式在中小功率得到稳定、高效率、高光束质量的绿光输出是完全可能的,高平均功率、高重复率下的稳定运行也有望达到。

为篇幅所限,对二极管泵浦内腔倍频腔参数的优化、纵模频率差异对偏振调制的影响以及激光横模结构对系统稳定性的影响等问题本文未作深入分析,有兴趣的读者可参见有关文献。

参考文献:

- [1] T Baer. Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. J O S A B, 1986, 3(9): 1175 - 1180.
- [2] Konno Susumu, Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa, et al. High - brightness 138W green laser based on an intracavity - frequency - doubled diode - side - pumped Q - switch Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 2000, 25(2): 105 - 107.
- [3] Dehua Li, Changhong Zhu, Volker Gaebler, et al. Theoretical and experimental studies of noise suppression for intracavity frequency doubled lasers with phase matching type I or II[J]. Opt Commun., 2001, 189: 357 - 364.
- [4] Volker Gaebler, Baining Liu, Hans Joachim Eichler. Efficient blue cw Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers[J]. Opt Lett, 2000, 25(18): 1343 - 1345.
- [5] V Wagni, G Cerullo, S De Silvestri, et al. Intracavity frequency doubling of a cw high - power TEM₀₀ Nd:YLF laser[J]. Opt Lett, 1993, 18(24): 2111 - 2113.
- [6] Michio Oka, Shigeo Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode - pumped Nd:YAG lasers[J]. Opt Lett, 1988, 13(10): 805 - 807.
- [7] T Y Fan. Single - axial mode, intracavity doubled Nd:YAG laser[J]. IEEE J Q E, 1991, 27(9): 2091 - 2093.
- [8] Tetsuo Kojima, Shuichi Fujikawa, Koji Yasui, et al. Stabilization of high - power diode - side - pumped intracavity - frequency - doubled cw Nd:YAG laser by compensating for thermal lensing of a KTP crystal and Nd:YAG rods[J]. IEEE J Q E, 1999, 35(3): 377 - 380.
- [9] V L Ustyugov, O A Orlov, M M Khaleev, et al. Self - stabilization of a continuous wave multimode green laser due to antiphase dynamics[J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(2): 154 - 156.