

耦合腔结构可调谐双频固体激光器的研究

吴霞 杨苏辉 陈颖 赵长明 刘志杰

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 研究了一种激光二极管(LD)抽运的频差可调谐双频固体激光器,对耦合腔实现双频的方法进行了分析。实验中使用输入镜与腔内插入标准具形成耦合腔实现单频运转,双 $\lambda/4$ 波片使单纵模激光频率分裂,通过改变两个 $\lambda/4$ 波片快轴之间的夹角来实现频差调谐。在 LD 抽运光功率为 290 mW 的条件下,获得了频差在 0~1.1 GHz 范围内可调、功率为 34 mW 的双频激光输出。

关键词 激光器;固体激光;双频激光;耦合腔

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0314003

Tunable Two-Frequency Solid-State Laser with Coupled-Cavity Configuration

Wu Xia Yang Suhui Chen Ying Zhao Changming Liu Zhijie

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A laser-diode-pumped two-frequency solid-state laser with tunable frequency difference is investigated, the principle of coupled-cavity is presented. Single-longitudinal mode oscillation is obtained from a coupled-cavity setup. Two quarter-wave plates are inserted to lift the degeneration of frequencies in orthogonal polarizations. 34 mW output power of two-frequency laser with tunable frequency difference is achieved. The beat note frequency can be continuously tuned from 0 to 1.1 GHz.

Key words lasers; solid-state laser; two-frequency laser; coupled cavity

OCIS codes 140.3055; 140.3015; 140.3050

1 引言

光载微波雷达(Lidar-Radar)是一种新体制的激光雷达,它将激光拍频产生的射频信号作为探测媒介^[1],在保证激光探测的高空间分辨率优势^[2]的同时相对于普通激光雷达具有更强的抗大气干扰能力^[3]。产生带有稳定微波载波的激光光源是实现 Lidar-Radar 系统的一个关键技术。频差可调谐的双频固体激光器由于具有结构简单、窄线宽、大频差和可以实现频率连续调谐等诸多优势,成为最为理想的光载微波源,在卫星通讯网络、短距离视频传输系统、移动宽带系统以及激光雷达系统中都有着重要的潜在应用价值^[4~6]。本文基于耦合腔选频的基

本原理,设计了一种频差可调谐的 Nd:YAG 激光器,并进行了实验验证,在激光二极管(LD)抽运光功率 290 mW 的条件下,获得了频差在 0~1.1 GHz 范围内可调、功率为 34 mW 的双频激光输出。

2 双频实现方案

要获得双频激光输出,首先要实现稳定的单纵模运转,利用腔内双折射效应使得两个正交的偏振光在谐振腔内有不同的光程,即产生光程差,从而产生频率分裂,实现双频输出^[7]。本文根据这一原理,在利用耦合腔实现单频运转的激光谐振腔内插入双 $\lambda/4$ 波片,通过调节两个波片夹角的大小来实现频

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-11-04

基金项目: 吴霞(1987—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: wx2049@126.com

作者简介: 杨苏辉(1968—),女,博士,副教授,博士生导师,主要从事固体、光纤激光器和激光雷达等方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn(通信联系人)

差可调谐的双频激光输出。

2.1 实现单纵模的方案原理

获得单纵模输出的方法有很多,有短腔法^[8]、环形腔法^[9~12]和标准具选频法^[13],此外扭转模腔法^[14]和耦合复合腔法^[15]也能实现单纵模输出。

耦合复合腔法又称为耦合腔法,由于其结构简单,腔内损耗较小,更有利于产生大功率、高效率的单频输出。图1为耦合腔选模基本原理图。耦合腔由两个子腔组成: C_{13} 腔是由工作物质 Nd:YAG 晶体端面与 M_3 构成的平-凹腔,由于腔内存在增益介质,是增益腔,所以又把它称为主动腔; C_{23} 腔是由法布里-珀罗(F-P)标准具 M_2 和凹面镜 M_3 构成,它是被动腔。在腔内插入 F-P 标准具来实现耦合腔,与单独使用标准具选频的原理不同,标准具选模对标准具的精细度(Finesse 数)要求很高,加工起来很困难,实际选择单纵模的能力与所要求性能也有很大差距,因此通常单个 F-P 标准具达不到选频的要求而需要两个不同参数的标准具组合进行粗选和精选来获得单纵模,而这样增大了腔内的损耗,激光器输出单频的效率较低。本实验中的标准具选用熔石英基底材料,折射率 $n=1.5$,厚度为 1 mm,两面未镀膜,其有效反射率为 4%,从而算出该 F-P 标准具的自由光谱宽度 $R_s=100$ GHz,精细度 $F=0.65$,得到对应的半峰全宽(FWHM)约为 150 GHz,远大于激光的纵模间隔(本实验中为 2.1 GHz),因此该标准具单频选择的效果不大,主要作用是通过构成耦合腔实现单频运转。

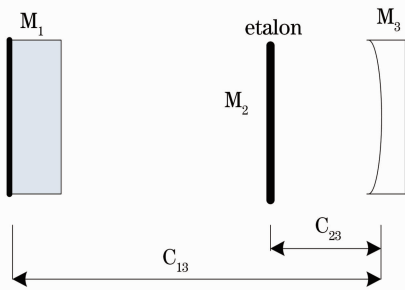


图1 耦合腔原理图

Fig.1 Principle diagram of the coupled cavity

在设计耦合腔时需要考虑两个问题:激光模式在两个谐振腔之间的空间和时间上的耦合。为了尽量降低耦合损耗,要使 C_{13} 腔和 C_{23} 腔之间模式互相

匹配,也就是说两个腔的横模场分布在空间上应尽量重合,即实现空间上的耦合;时间耦合指的是同时满足两个谐振腔谐振条件的模式的损耗最小,而抑制其他模式的光,达到选频的目的。所以空间耦合程度直接影响耦合腔的效率,而时间上的耦合是决定能否实现稳定单频输出的关键因素。

可以将 C_{23} 看成是对频率具有选择作用的输出镜,即从主动腔 C_{13} 看过去,某个激光模式的输出损耗可以看成是由被动腔 C_{23} 所控制的,对于不同频率的激光其输出损耗并不相同,则表征时间耦合参数的腔 C_{23} 的有效功率反射系数 $R(f)$ 和相移 Φ_{23} 可表示为^[16]

$$R(f) = \frac{(\sqrt{R_2} - \sqrt{R_3})^2 + 4\sqrt{R_2 R_3} \sin^2 \phi_{23}}{(1 + \sqrt{R_2 R_3})^2 + 4\sqrt{R_2 R_3} \sin^2 \phi_{23}}, \quad (1)$$

$$\Phi_{23} = \frac{2\pi n d_{23}}{\lambda} = \frac{2\pi n d_{23} \nu}{c} = \frac{2\pi n d_{23} (\nu_0 + \Delta\nu)}{c}. \quad (2)$$

式中 Φ_{23} 为 C_{23} 中光往返一次造成的相位移, R_1 、 R_2 和 R_3 分别为镜 M_1 、 M_2 和 M_3 的反射率, d_{23} 为标准具与输出镜之间的距离。

选定激光谐振腔腔长 L 约为 70 mm, Nd:YAG 晶体厚度为 2.5 mm,一端镀 808 nm 增透、1064 nm 高反膜作为激光谐振腔的入射面。标准具与输出镜距离为 7 mm。为了比较,分别尝试了输出透射率为 2%、3% 和 5% 的输出镜,将其值代入(1)式,得到这三种情况下 M_2 的功率反射系数和频率失谐量 ($\Delta\nu$, 即与中心频率相偏离的量)之间的关系如图 2 所示。

对于腔长 $L=70$ mm 的激光谐振腔,纵模间隔约为 2.14 GHz。从图中可以看出,在每个有效反射率曲线内有 4~5 个纵模,相邻模式之间的有效反射率差大于 0.01% (将图 2 中曲线变化最平缓的部分放大可以看出,有效反射率差最小时相邻两个模式之间的差为 0.07%),即不同模式之间的损耗差大于 0.01%,因此在理论上可进行有效的选模^[17]。不同透射率对选频的影响也不同,随着输出透射率的增大,相邻模式之间的有效反射率差越大,选模更容易实现。

图 3 是实验测量的输出透射率 $T=2\%$ 、 3% 和 5% 时抽运功率与激光输出功率之间的关系曲线,图中实线部分表示激光单频输出稳定,虚线表示单频输出不稳定或出现多模振荡。

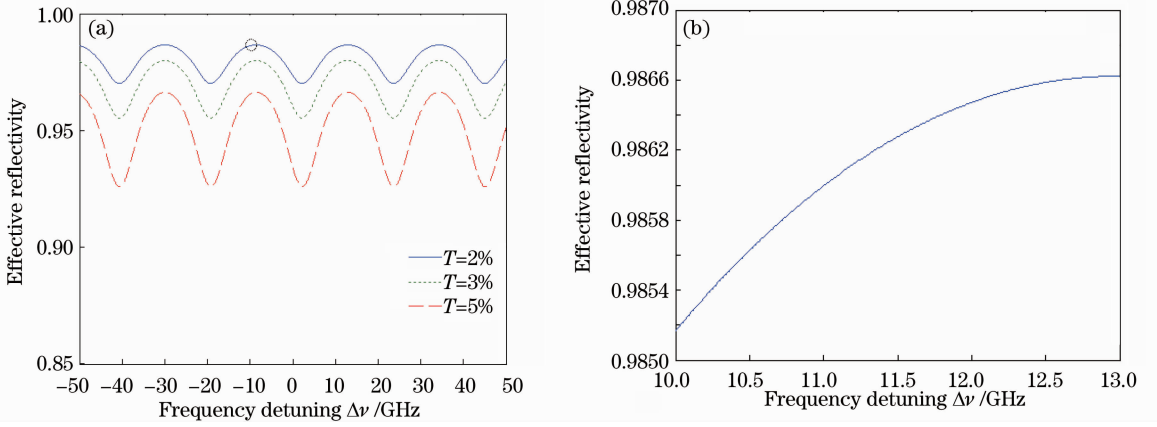


图 2 (a)不同输出透射率下 M_2 的功率反射系数和频率失谐量之间的关系曲线；(b)功率反射系数变化最小时，而 $T=2\%$ 时的放大图

Fig. 2 (a) Effective power reflectivity of C_{23} as a function of frequency detuning from the central frequency; (b) enlarged diagram of the minimum variation of effective power reflectivity, namely $T=2\%$

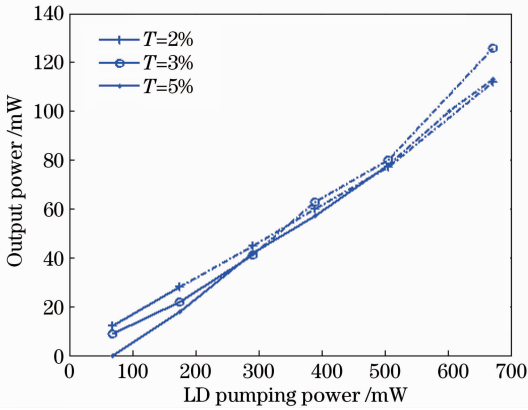


图 3 不同输出透射率下抽运功率和激光输出功率的关系曲线

Fig. 3 Output power versus input pumping power of the coupled-cavity setup with different output couplers

由图 3 可知, $T=2\%$ 时抽运功率大于 175 mW 的单纵模输出不稳定; $T=3\%$ 时抽运功率大于 290 mW 的单纵模输出不稳定; $T=5\%$ 时抽运功率大于 506 mW 的单纵模输出不稳定。随着抽运功率的增大, 激光单纵模输出的稳定性越差, 原因可能是由于 LD 抽运源随着抽运功率的增大抽运波长的中心频率发生了温度漂移导致 Nd:YAG 不同模式获得的增益发生了变化, 同时 Nd:YAG 晶体热效应使得激光频率发生了漂移。不同透射率下单频输出的

稳定性也不一样, 相对于透射率 $T=2\%$ 和 $T=3\%$, 选用 $T=5\%$ 的输出镜激光输出的功率略低, 但具有更好的输出频率特征。综合考量, 选用输出透射率为 $T=5\%$ 的输出镜, 在激光谐振腔内加入 F-P 标准具形成耦合腔来实现激光单纵模输出。

2.2 双频激光输出的实现原理

早在 1965 年, Evtubov 等^[18] 就指出在驻波激光器中两个 $\lambda/4$ 波片之间正交的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光之间会存在频差, 频差的大小由两个 $\lambda/4$ 波片快轴之间的夹角来决定。

2.2.1 双频激光在谐振腔各处的偏振态

为了简化计算分析, 假设两个 $\lambda/4$ 波片中间为各向同性介质, 两个 $\lambda/4$ 波片两端为反射镜组成的谐振腔, 纵向为 z 轴, 激光在谐振腔中振荡, 取与 z 轴垂直的某一个方向为 x 轴, 第一个波片与 x 轴夹角为 α , 第二个波片与 x 轴夹角为 β , 则两个波片的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha + j \sin^2 \alpha & \sin \alpha \cos \alpha (1 - j) \\ \sin \alpha \cos \alpha (1 - j) & \sin^2 \alpha + j \cos^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_\beta = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta + j \sin^2 \beta & \sin \beta \cos \beta (1 - j) \\ \sin \beta \cos \beta (1 - j) & \sin^2 \beta + j \cos^2 \beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设光从左面反射镜出发, 在腔内来回一周后自洽, 其琼斯矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_\alpha \mathbf{J}_\beta \mathbf{J}_\alpha \mathbf{J}_\beta = \begin{bmatrix} \cos 2(\alpha - \beta) + j \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) & -j \cos 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \\ -j \cos 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) & \cos 2(\alpha - \beta) - j \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

求解本征方程 $\mathbf{J}\mathbf{E} = \lambda\mathbf{E}$ 得到对应的本征值为

$$\lambda_1 = \cos 2(\alpha - \beta) + j \sin 2(\alpha - \beta) = \exp[2j(\alpha - \beta)], \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \cos 2(\alpha - \beta) - j \sin 2(\alpha - \beta) = \exp[-2j(\alpha - \beta)]. \quad (7)$$

因此, 两本征态的相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2(\alpha - \beta) - [-2(\alpha - \beta)] = 4(\alpha - \beta)$ 。通过计算得到 \mathbf{J} 的本征向量为

$$\mathbf{E}_1 = k_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sin 2\alpha - 1}{\cos 2\alpha} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_2 = k_2 \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sin 2\alpha + 1}{\cos 2\alpha} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

可见 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 为两个正交偏振的线偏光。

同理, 若光从右面反射镜出发, 可以得到

$$\mathbf{E}'_1 = k'_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sin 2\beta + 1}{\cos 2\beta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}'_2 = k'_2 \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sin 2\beta - 1}{\cos 2\beta} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

也是两个正交偏振的线偏振光, 两本征态的相位差也为 $\Delta\varphi = -4(\alpha - \beta)$ 。

若光是由两个波片之间的一点出发, 在腔内往返一周形成自洽, 其琼斯矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_\alpha \mathbf{J}_\beta \mathbf{J}_\beta \mathbf{J}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos 2(\alpha - \beta) & \sin 2(\alpha - \beta) \\ -\sin 2(\alpha - \beta) & \cos 2(\alpha - \beta) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

求解本征方程从而得到 \mathbf{J} 的本征向量

$$\mathbf{E}''_1 = k''_1 \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}''_2 = k''_2 \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

依然是正交的偏振光, 且两本征态的相位差为依然 $\Delta\varphi = -4(\alpha - \beta)^{[19]}$ 。

2.2.2 双频激光的频差分析

由 2.2.1 节可知, 在激光谐振腔输出端两本征态的相位差为 $4(\alpha - \beta)$ 。

根据谐振腔的本征模理论, 每个本征模在腔内往返一周后满足自洽条件, 从而得出腔的本征频率为

$$\nu_1 = \frac{c}{2L} \left[q + \frac{\pi + 2(\alpha - \beta)}{2\pi} \right], \\ \nu_2 = \frac{c}{2L} \left[q + \frac{\pi - 2(\alpha - \beta)}{2\pi} \right]. \quad (12)$$

纵模简并被分开, 腔内存在 ν_1 、 ν_2 两个频率的光, 即一个单纵模分裂成两个频率的光。这两个频率之间的频差为

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = \frac{(\alpha - \beta)c}{\pi L}. \quad (13)$$

在垂直于传播方向的截面内旋转任一波片, 可改变两波片的夹角 $(\alpha - \beta)$, 这时将输出两个不同频率的光, 且两模频差随 $(\alpha - \beta)$ 的变化而变化。在这里, 有三个特殊情况:

1) $\alpha - \beta = 0$, 双频频差为 0, 谐振腔内模式简

并, 激光器单纵模输出;

2) $\alpha - \beta = \frac{\pi}{4}$, 此时 $\Delta\nu = \frac{(\alpha - \beta)c}{\pi L'} = \frac{c}{4L'}$, 频率分裂量为纵模间隔的一半, 是可能达到的最大频率分裂量;

3) $\alpha - \beta = \frac{\pi}{2}$, 此时 $\Delta\nu = \frac{(\alpha - \beta)c}{\pi L'} = \frac{c}{2L'}$, 频率分裂量等于纵模间隔, 发生频率简并, 激光器也是单纵模输出。

2.3 双频激光器的结构

根据前面的理论分析和实验验证, 最后拟定的双频激光谐振腔如图 4 所示, 增益介质为 2.5 mm 厚、1% 掺杂原子数分数的 Nd:YAG 晶体, 抽运源为光纤耦合输出的激光二极管, 光纤芯径为 100 μm , 抽运光通过耦合透镜组入射到增益介质上, 增益介质上镀 808 nm 增透、1064 nm 高反膜的一面作为激光谐振腔的入射面, 腔内标准具厚度为 1 mm, 两个波片为 1064 nm 的 $\lambda/4$ 波片, 输出镜曲率半径为 100 mm, 对 1064 nm 光透射率为 5%, 整个激光谐振腔腔长为 70 mm。

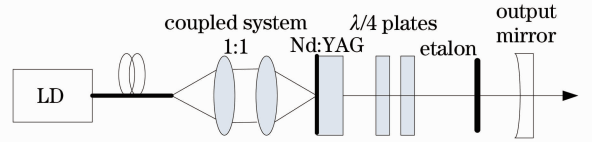


图 4 基于耦合腔的频差可调谐固体双频激光器结构示意图

Fig. 4 Diagram of the tunable two-frequency solid-state laser with coupled cavities

由于装置中所用的是耦合比例为 1:1 的透镜组耦合, 右侧透镜焦点上的光斑直径仍然是 100 μm 。当激光谐振腔为 70 mm, 输出镜曲率半径 100 mm 时, 谐振腔内振荡光基模高斯光束的腰斑半径为

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda \sqrt{L(R-L)}}{\pi}} = 124 \mu\text{m} > \frac{100 \mu\text{m}}{2}, \quad (14)$$

满足基模匹配条件。

3 实验结果和分析

根据图 3 的实验结果, 并考虑到单纵模输出的稳定性, 采用 290 mW 的 LD 抽运功率对激光器进行抽运, 并使用美国 Burleigh 公司的扫描 F-P 干涉仪通过数字示波器 (Tektronix TDS5104B) 观测激光器的输出模式。调节腔内 F-P 标准具的位置, 使激光器有稳定的单频激光输出, 在单频激光稳定运

转的情况下加入双 $\lambda/4$ 波片,当两个波片快轴夹角为 0° 时,激光未发生频率分裂,如图 5 所示,其中上部波形是扫描 F-P 干涉仪的锯齿波电压信号,下部波形是光探测器对应的输出信号。

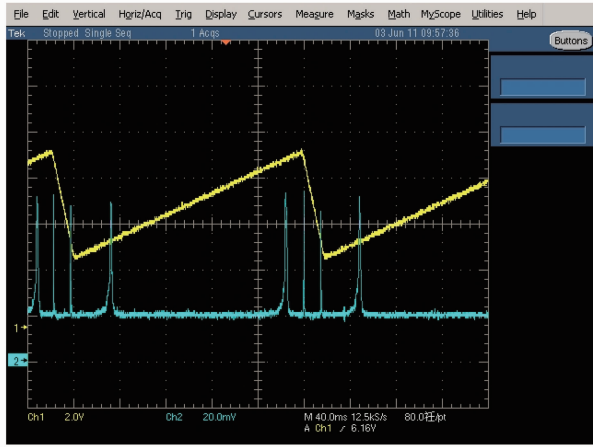


图 5 双 $\lambda/4$ 波片快轴夹角为 0° 时,激光器单频输出
Fig. 5 Fabry-Pérot interferometer(FPI) scan of single frequency oscillation when the angle is 0°

逐渐加大两个 $\lambda/4$ 波片快轴夹角,发生频率分裂,且频差逐渐增大。当夹角为 45° 时,两个模式的频差达到最大,如图 6 所示,测得的最大频差为 1.10 GHz,约为纵模间隔 2.14 GHz 的一半,与理论分析基本一致。再加大两个波片快轴的夹角,频差随之减小,当夹角增大到 90° 时,频差为 0,输出单纵模。

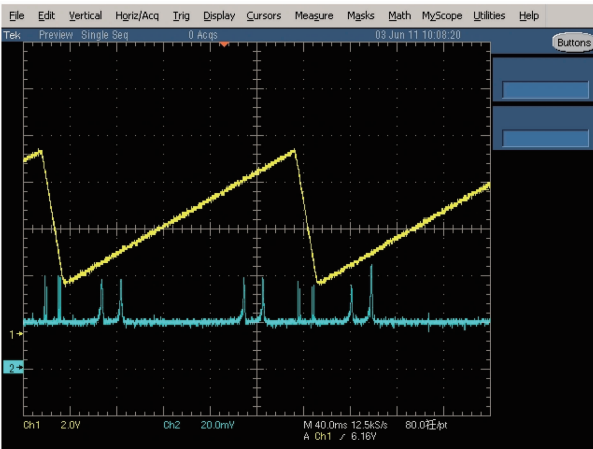


图 6 双 $\lambda/4$ 波片快轴夹角为 45° 时,达到最大频差输出
Fig. 6 FPI scan of two frequency oscillation when the angle between the two quarter-wave plates is 45°

改变两个 $\lambda/4$ 波片快轴夹角,用示波器观察双频的频率,同时用功率计读取激光输出的功率值,得到双频激光频差与激光输出功率的关系曲线,如图 7 所示。

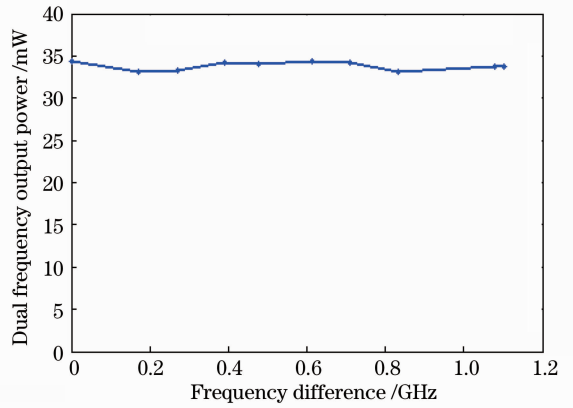


图 7 不同频差大小下的功率输出
Fig. 7 Dual frequency output power as a function of frequency difference

由图 7 可知,当频差改变时,双频激光的输出功率基本稳定在 34 mW 附近。

微调两个 $\lambda/4$ 波片的快轴夹角,当夹角约为 6° 时,用 DA-100 探测器探测扫描 F-P 得到光频谱结构图,通过测量计算,可知频差约为 110 MHz。此时,在激光器输出镜后放置一个偏振片,并适当旋转其角度,使激光器输出的双频正交偏振光的电场矢量在确定空间位置上的分量叠加形成拍,然后用 Newfocus 1611 高速光电探测器探测,得到双频激光成拍的波形如图 8 所示,从示波器上可以读出此时准确的拍频频率为 100 MHz(由于探测器的放大装置有所损坏,探测到的波形图波形包络里存在探测器本身的噪声)。

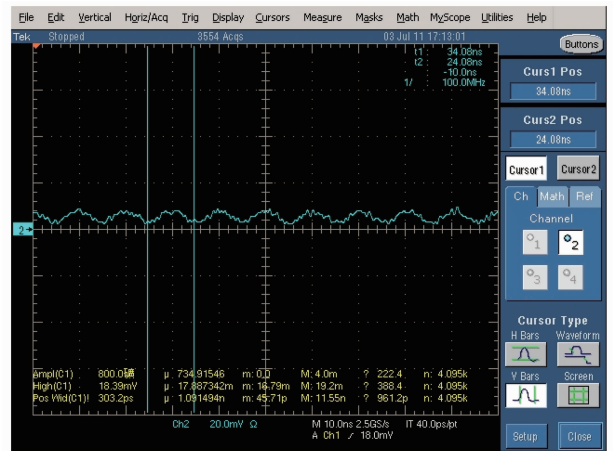


图 8 高速光电探测器测得的频差间隔为 100 MHz 的双频激光拍的波形图
Fig. 8 Beat signal observed on an oscilloscope when the two frequency difference is 100 MHz

4 结 论

通过在腔内加入 F-P 标准具形成耦合腔结构实现了稳定单频输出,再插入双 $\lambda/4$ 波片实现了频差可调谐的双频激光输出。对耦合腔结构和腔内各处的激光偏振态进行了理论分析,证明了耦合腔理论的可行性以及在 $\lambda/4$ 波片两侧得到两个正交的线偏振光。实验中获得频差在 0~1.10 GHz 范围内连续可调的双频激光输出,在 290 mW 的抽运功率下输出功率基本稳定在 34 mW,光-光转换效率约为 11.7%。研究内容和结论为今后研究光载微波雷达所需的高功率高稳定性的双频激光输出提供了一定的参考。但由于本实验中选用的耦合腔系统只实现了时间上的耦合,并没有达到很好的空间上耦合,因此耦合腔的损耗比较大,在今后的研究中可以采用晶体镀膜的方法优化耦合腔结构,以实现更高功率的双频激光输出。

参 考 文 献

- 1 G. Pillet, L. Morvan, D. Dolfi *et al.*. Wide band dual-frequency lidar-radar for simultaneous velocity and high-resolution range profile measurements[C]. *SPIE*, 2009, **7323**: 73230Z
- 2 L. J. Mulle, A. J. C. Vieira, P. R. Herczfeld *et al.*. Application of radar technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1995, **43**(9): 2370~2377
- 3 Wang Sheng, Yang Shuhui, Wu Xia. Experimental study on influence of atmospheric turbulence on coherence of dual-frequency laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **084202**: 1~4
- 4 Huang Chunning, Li Yan, Guo Hui *et al.*. A novel tunable dual-frequency laser with large frequency difference [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(3): 229~231
黄春宁,李岩,郭辉等. 新型大频差可调谐双频激光器[J]. *光电子•激光*, 2002, **13**(3): 229~231
- 5 Li Lixin, Li Lei. Progress on pulse-to-pulse coherent beat not generated by two-frequency solid-state lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(6): 591~594
李立新,李磊. 双频固体激光器产生相干脉冲输出的研究进展[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(6): 591~594
- 6 Jiao Mingxing, Xing Junhong, Liu Yun *et al.*. Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid-state laser with large frequency difference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2784~2789
焦明星,邢俊红,刘芸等. 双腔大频差双频全固态激光器设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2784~2789
- 7 Zhang Shulian. Principles of Orthogonal-Polarized Laser [M].

- Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 52~71
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2005. 52~71
- 8 Yan Ping, Wu Keying, He Bin *et al.*. Laser diode pumped Nd:YLF laser [J]. *J. Dalian University of Technology*, 1997, **37**(s2): 183~185
闫平,吴克瑛,何斌等. LD泵浦Nd:YLF激光器研究[J]. *大连理工大学学报*, 1997, **37**(s2): 183~185
- 9 Wu Keying, Wei Guanghui, Zhao Changming *et al.*. Design of diode pumped unidirectional nonplanar single-frequency ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1245~1250
吴克瑛,魏光辉,赵长明等. 激光二极管抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器的设计[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1245~1250
- 10 Zhao Weifang, Hou Wei, Li Gang *et al.*. Single-drequence Nd:YAG ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2810~2812
赵伟芳,侯伟,李港等. Nd:YAG 环形腔单频激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2810~2812
- 11 Zhao Weifang, Hou Wei, Li Gang *et al.*. 7.5 W Nd:GdVO₄ single-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0514003
赵伟芳,侯伟,李港等. 7.5 W Nd:GdVO₄ 环形腔单频激光器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0514003
- 12 Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. 10 W linearly polarized ring cavity configuration CW single-frequency laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 793~796
陈三斌,周寿恒,赵鸿等. 10 W 线偏振连续单频环形腔激光器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 793~796
- 13 H. G. Danielmeyer. Stabilized efficient single-frequency Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(2): 101~104
- 14 Hao Hongxu. Injection Seeding Single Frequency 1.06 μm Laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1998
郝宏旭. 种籽注入 1.06 μm 单频激光器系统研究[D]. 北京:北京理工大学光电学院, 1998
- 15 Jing Li, Suhui Yang. High efficient single-frequency output at 1991 nm from a diode-pumped Tm:YAP coupled cavity[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12161~12167
- 16 C. Pedersen, P. L. Hansen, T. Skettrup *et al.*. Diode-pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser with a set of coupled resonators [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12): 1389~1391
- 17 A. Clobes, M. Brienza. Single frequency traveling wave Nd:YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(6): 265~267
- 18 V. Evotuhov, A. E. Siegman. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(1): 142~143
- 19 Li Lei, Zhao Changming, Zhang Peng *et al.*. The study on diode-pumped two-frequency solid-state laser with tunable frequency difference[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2664~2669
李磊,赵长明,张鹏等. 激光二极管抽运频差可调谐双频固体激光器的研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2664~2669

栏目编辑: 宋梅梅