

高功率宽带射频调制连续激光源

程丽君 杨苏辉 赵长明 张海洋

High-power wideband radio-frequency intensity modulated continuous wave laser

Cheng Li-Jun Yang Su-Hui Zhao Chang-Ming Zhang Hai-Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 034203 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172017

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172017>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I3>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长距离多站点高精度光纤时间同步

High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations

物理学报.2017, 66(20): 200701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.200701>

基于  $WS_2$  可饱和吸收体的调 Q 锁模 Tm, Ho:LLF 激光器

Passively Q-switched mode-locked Tm, Ho:LLF laser with a  $WS_2$  saturable absorber

物理学报.2017, 66(11): 114207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114207>

流体直接冷却薄板条介质温度及应力的解析表达

The analytic expressions of temperature and stress in directly liquid cooled thin slab laser

物理学报.2016, 65(5): 054204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054204>

Nd:YAG 陶瓷与单晶  $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$  跃迁的弱谱线多波长激光性能对比

Multiple weak-line laser operation from Nd:YAG  $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$  transition in ceramic and crystal

物理学报.2015, 64(20): 204204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204204>

分区域主动冷却薄片激光介质的理论和实验研究

Theoretical and experimental research on district cooling for thin disk-type laser medium

物理学报.2013, 62(12): 124204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124204>

# 高功率宽带射频调制连续激光源\*

程丽君<sup>1)</sup> 杨苏辉<sup>1)2)†</sup> 赵长明<sup>1)</sup> 张海洋<sup>1)</sup>

1)(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2)(精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

(2017年9月11日收到; 2017年10月11日收到修改稿)

射频强度调制激光作为激光雷达系统的载波可以有效提高系统的抗干扰和抗散射能力, 高功率宽带射频强度调制光源是实现高分辨率远距离探测的关键. 本文采用在Nd:YAG激光器的耦合腔中插入一对四分之一波片的方法实现了频差调谐范围为30 MHz—1.5 GHz的双频激光输出, 结合光纤振荡功率放大技术, 将双频信号光功率放大为50 W. 耦合腔双频种子源具有良好的功率和频率稳定性, 输出功率为9.5 mW时, 功率标准差为0.145 mW, 稳定性为1.52%, 输出双频激光的频差为250 MHz时, 拍频的标准差为1.6144 MHz. 种子光进行三级光纤功率放大, 得到50 W双频激光输出. 放大后的双频激光功率波动范围小于0.1 W, 双频拍频的标准差为1.777 MHz, 很好地保持了放大之前的功率稳定性和双频频差稳定性.

**关键词:** 光载微波, 光纤放大, 高功率, 宽带可调谐

**PACS:** 42.55.Rz, 07.60.Vg

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172017

## 1 引言

载波调制激光雷达采用射频强度调制的光源作为载波进行探测, 兼具激光雷达和微波雷达的优点, 近年来得到广泛关注, 尤其是其抗大气干扰及散射的能力使得载波调制激光雷达在相干探测、成像、大气污染监测等方面有重要应用<sup>[1-5]</sup>. 要实现远作用距离的高精度测距, 则需要宽带可调谐高功率载波调制光源, 双频激光器是实现宽带高功率载波调制光源的有效手段, 近年来得到国内外学者的广泛关注.

2005年, 法国雷恩大学Brunel等<sup>[6]</sup>利用钽酸锂晶体搭建了双频固体激光器, 同时结合电光调制和温度调制实现了0—60 GHz的大频差可调谐双频激光输出, 功率为4 mW; 2011年, Maxim等<sup>[7]</sup>利用单频分步反馈光纤激光器的光栅的各向异性实现了双频激光输出, 其拍频的调节范围约600 MHz, 功率为300 mW; 2015年, 西安理工大学邢俊红和

焦明星<sup>[8]</sup>在单频激光器内加入分光器件形成双腔结构, 实现激光的双频输出, 其中双频激光的频差为0.3—3 GHz, 功率为53 mW. 在大功率双频激光的实现方面, 2014年, 胡淼等<sup>[9]</sup>将一个双纵模输出的激光进行行波放大, 放大器用两个半导体808 nm激光器同时抽运, 得到2.38 W的双频激光, 频差为47 GHz; 2015年, He等<sup>[10]</sup>通过一级光纤放大装置将双频激光功率放大至10 W, 频差调谐范围为125—175 MHz; 国防科技大学对双波长光纤放大器的特点进行了深入研究<sup>[11]</sup>, 为了抑制光纤放大器中的非线性效应, 利用三级光纤放大系统将频差为150 MHz的双频激光放大至434 W<sup>[12]</sup>. 上述研究中侧重各自的应用方向, 分别实现了大频差或高功率, 但是没有同时达到宽调谐范围和高功率的研究结果, 而高功率宽带射频强度调制光源是远距离测距和成像所必不可少的.

本文将大频差连续可调谐双频激光和光纤放大结合, 同时实现了双频激光的大频差调谐范围和高功率输出, 对光纤放大前后双频激光源的功率稳

\* 国家自然科学基金(批准号: 61275053, 61741502)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [suhuiyang@bit.edu.cn](mailto:suhuiyang@bit.edu.cn)

定性、双频频差可调谐性以及双频频差的频率稳定性进行了对比研究,结果显示光纤放大器可以很好地保持双频种子源的指标,该宽带可调谐双频激光源将用于远距离高分辨率激光扫描成像系统中.

## 2 双频激光种子源

如图 1 所示,激光器为激光二极管(LD)端面抽运Nd:YAG直腔结构,腔长  $L = 50$  mm. LD抽运光经过耦合系统聚焦在Nd:YAG晶体端面,聚焦光斑直径为  $50 \mu\text{m}$ . 晶体的尺寸为  $\phi 8 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,采用热电致冷器进行冷却,温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在其端面M1镀808 nm高透、1064 nm高反膜作为抽运光的输入端腔镜,另一面M2不镀膜,自然反射率约8%,输出耦合镜M3为曲率半径  $R = 100$  mm的凹面镜,其对1064 nm激光的功率透过率为5%,镜面M1, M2和M3一起形成耦合腔,使低增益激光器形成单纵模振荡<sup>[13,14]</sup>,耦合腔的选频原理与复合标准具组的选频原理类似,即只有同时满足两个腔的谐振条件的纵模才能形成稳定振荡. 腔内插入通光孔径为0.5 mm的小孔光阑用以限制高阶横模的振荡,测量得到输出激光的  $M^2$  等于1.13.

两个四分之一波片(P1和P2)使单纵模振荡的激光分裂成两个正交偏振模式,并且产生频率分裂,已知两个四分之一波片的琼斯矩阵分别为

$$J_\alpha = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha + i \sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha(1 - i) \\ \cos \alpha \sin \alpha(1 - i) & \sin^2 \alpha + i \cos^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$J_\beta = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta + i \sin^2 \beta & \cos \beta \sin \beta(1 - i) \\ \cos \beta \sin \beta(1 - i) & \sin^2 \beta + i \cos^2 \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\alpha, \beta$  分别是入射光的偏振方向与P1快轴和P2快轴之间的夹角,则激光腔内两个本征模的向量互相垂直,本征频率差为  $\Delta\nu = \Delta\theta c/(\pi L)$ ,其中  $\Delta\theta = |\alpha - \beta|$  为两波片快轴之间的夹角,  $c$  是真空中光速,旋转P2改变  $\Delta\theta$ ,即可得到频差可调谐的双频激光输出<sup>[15]</sup>. 当  $\Delta\theta = \pi/4$  时,可得到最大频差为纵模间隔一半的双频激光输出,即最大频差为  $c/(4L)$ .

激光器输出功率为9.5 mW时,旋转P2改变两波片之间角度,令  $\Delta\theta$  在  $0-45^\circ$  之间变化,实验测得  $\Delta\theta$  与  $\Delta\nu$  之间的关系如图 2 所示.

实际操作中随着双频频差从0增加到  $c/(4L)$ ,会发生跳模现象. 如图 3(a) 所示,  $\nu_q^p$  和  $\nu_q^s$  是纵模

$\nu_q$  的两个偏振态成分,  $\nu_{q-1}^p$  和  $\nu_{q-1}^s$  是纵模  $\nu_{q-1}$  的两个偏振态成分,当双频频差较小时,  $\nu_q^p$  和  $\nu_q^s$  的增益超过阈值,形成稳定双频振荡,随着两者的频差增大为  $c/(4L)$ ,如图 3(b) 所示,  $\nu_{q-1}^s$  和  $\nu_q^p$  的频率差也变成  $c/(4L)$ ,此时  $\nu_{q-1}^s$  的增益超过  $\nu_q^s$  的增益,输出光变为  $\nu_{q-1}^s$  和  $\nu_q^p$ ,发生跳模现象.

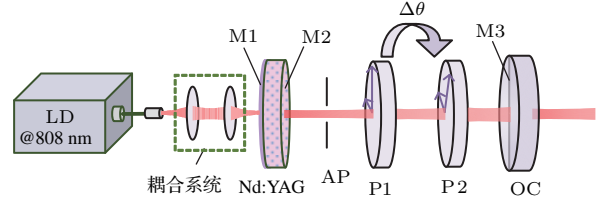


图 1 双频激光器示意图(AP, 光阑; OC, 输出耦合镜)  
Fig. 1. Dual-frequency laser setup. AP, aperture; OC, output coupler.

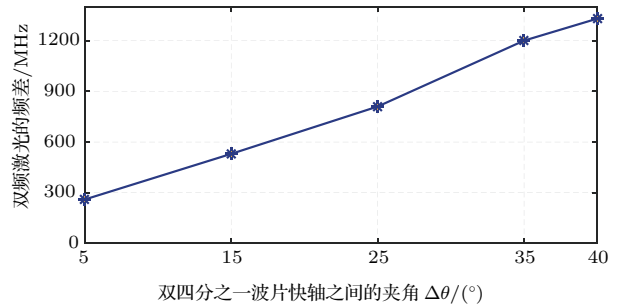


图 2 双频频差  $\Delta\nu$  随两个四分之一波片快轴夹角  $\Delta\theta$  的变化  
Fig. 2. Frequency difference  $\Delta\nu$  versus the angle between the two fast axes  $\Delta\theta$ .

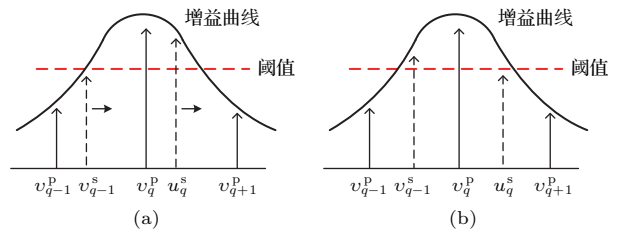


图 3 (a) 双频激光振荡模式示意图; (b) 双频频差等于  $c/(4L)$  时发生跳模  
Fig. 3. (a) Dual frequency laser modes; (b) longitudinal modes hopping when frequency difference approaches  $c/(4L)$ .

输出双频光经 Fabry-Perot (F-P) 干涉仪扫描后在示波器上波形如图 4 所示,其中第一个图中的红线表示 F-P 干涉仪的扫描电压,  $\Delta t$  是扫描时间间隔,不同扫描时间间隔对应不同频差  $\Delta\nu$ .

由于双频激光的两个分量的偏振方向相互垂直,因此利用格兰棱镜,令双频光的两个偏振方向与格兰棱镜的偏振方向成  $45^\circ$  放置,双频激光通过

后可以形成拍频信号, 用频谱仪测量得到的拍频信号如图 5 所示, 可以看出随着四分之一波片的转动, 拍频信号从 100 MHz 到 1.5 GHz 连续可调谐, 信噪比大于 25 dB.

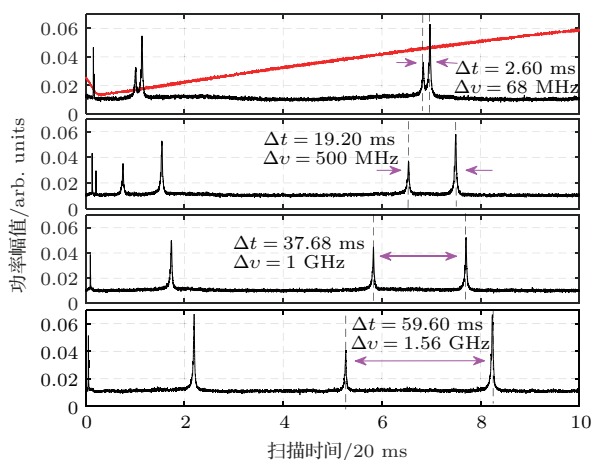


图 4 不同频差的双频激光模式在示波器上的波形  
Fig. 4. Dual-frequency laser modes at different  $\Delta\nu$  shown on an oscilloscope.

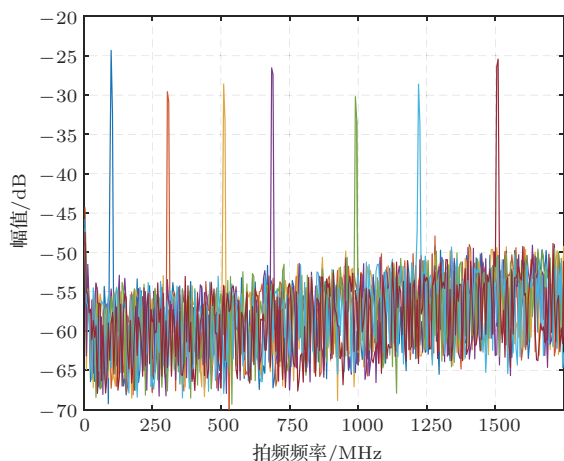


图 5 不同频差的双频激光拍频信号在频谱仪上的显示  
Fig. 5. Different beat-notes shown in frequency spectrograph.

实验测量了双频激光的功率在 30 min 内的稳定性, 如图 6 所示. 双频激光功率的变化范围小于 0.8 mW, 根据标准差的计算公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2},$$

其中  $S_i$  为样本值,  $\bar{S}$  为样本均值,  $n$  是样本个数, 将测得的激光功率作为样本得到功率的标准差为 0.145 mW, 相对稳定性  $\eta = \sigma/\bar{S}$  为 1.52%. 双频激光功率的抖动主要是同相噪声和反相噪声引起, 其中同相噪声由弛豫振荡引起<sup>[16,17]</sup>, 反相噪声由两个偏振模式对上能级粒子数的竞争引起<sup>[18,19]</sup>.

使用高精度频率计测量了拍频信号的稳定性, 如图 7 所示. 20 min 内拍频的频率上下浮动范围小于 8 MHz, 代入标准差公式得出拍频信号的标准差为 1.6144 MHz, 相对稳定性为 0.64%, 其中拍频信号的抖动是由晶体温度的浮动引起的.

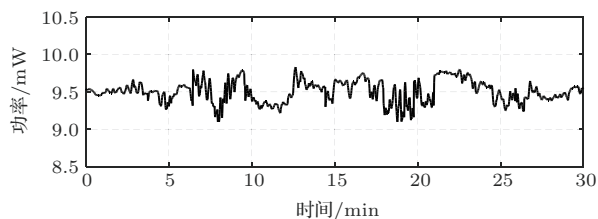


图 6 双频激光在 30 min 内的功率稳定性

Fig. 6. Power stability during 30 min.

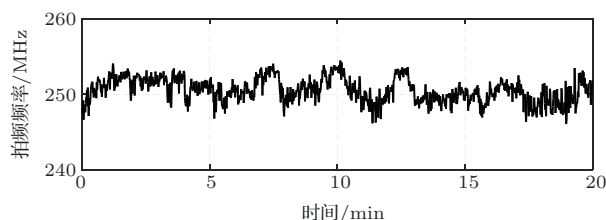


图 7 双频频差在 20 min 内的频率稳定性

Fig. 7. Beat-note frequency stability during 20 min.

### 3 双频光纤功率放大系统

#### 3.1 三级光纤放大装置

采用半导体抽运光纤功率放大器对双频种子光进行放大, 光纤放大器实验装置如图 8 所示. 把自聚焦光纤准直器反向应用, 将双频种子光耦合进入单模光纤, 耦合效率为 33.7%, 当种子光功率为 9.5 mW 时, 耦合入光纤的功率为 3.2 mW, 由于种子源功率较低, 为了抑制光纤中的自发辐射放大噪声, 采用三级放大系统<sup>[20]</sup>, 抽运源均采用波长为 976 nm 的半导体激光器. 第一级放大阶段抽运功率为 600 mW, 增益光纤为单模掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤 (5 m, 6/125  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.13$ ), 抽运光和种子激光分别经过光隔离器通过波分复用耦合器同向耦合进入增益光纤, 经过第一级放大, 双频激光的功率被放大为百毫瓦量级; 第二级放大阶段抽运功率为 10 W, 功率被放大至瓦量级, 其中增益光纤为双包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤 (5 m, 10/125  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.075/0.46$ ), 模场适配器 (MFA) 用来匹配传输光纤和增益光纤

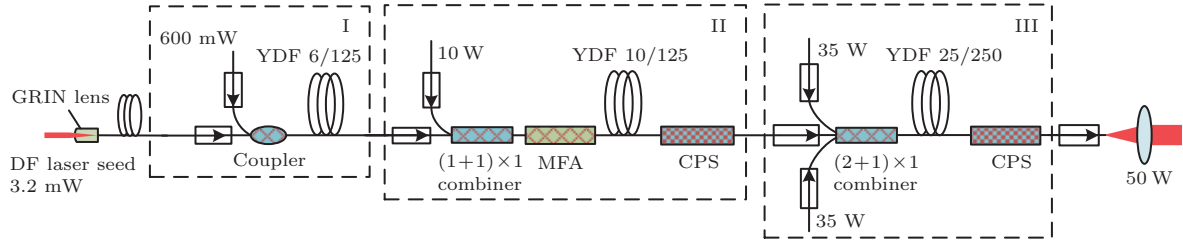


图8 双频激光三级光纤放大示意图

Fig. 8. Dual-frequency laser three-stage fiber amplifier.

的不同芯径, 进而减小损耗, 光功率剥离器 (CPS) 在光纤输出端, 用于去除内包层中残留抽运光和从纤芯泄漏到内包层中传输的放大自发辐射, 使纤芯内的信号光保持良好的光束质量; 第三级放大阶段抽运功率为 70 W, 由两个 35 W 半导体激光源经过  $(2+1) \times 1$  光纤合束器提供, 双频激光的功率被放大至 50 W, 其中增益光纤为双包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤 (5 m, 25/250  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.065/0.46$ ).

信号光在增益光纤内放大过程中的传输方程为

$$\frac{dP_P(z)}{dz} = [(\sigma_P^e + \sigma_P^a)N_2(r, \theta, z) - \sigma_P^a N(r, \theta, z)] \times P_P(z)\Gamma_P - \alpha_P P_P(z), \quad (3)$$

$$\frac{dP_S(z)}{dz} = [(\sigma_S^e + \sigma_S^a)N_2(r, \theta, z) - \sigma_S^a N(r, \theta, z)] \times P_S(z)\Gamma_S - \alpha_S P_S(z), \quad (4)$$

式中,  $P_P(z)$ ,  $P_S(z)$  分别是抽运光功率和信号光功率随传输距离  $z$  变化的函数;  $\sigma_P^e = 1.7131 \times 10^{-24} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_P^a = 1.7669 \times 10^{-24} \text{ m}^2$  分别是抽运光的发射和吸收横截面积;  $\sigma_S^e = 3.978 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_S^a = 6.4 \times 10^{-27} \text{ m}^2$  分别是信号光的发射和吸收横截面积;  $\alpha_P = 0.04$ ,  $\alpha_S = 0.005$  分别是抽运光和信号光的吸收系数;  $\Gamma_P = 0.01$ ,  $\Gamma_S = 0.9964$  分别是抽运光和信号光的重叠因子;  $N(r, \theta, z) = 5 \times 10^{25} / \text{m}^3$  是  $\text{Yb}^{3+}$  的掺杂浓度, 且有

$$N_2(r, \theta, z) = \frac{\frac{\sigma_P^a}{h\nu_P} P_P(z)\Gamma_P + \frac{\sigma_S^a}{h\nu_S} P_S(z)\Gamma_S}{\frac{\sigma_P^a + \sigma_P^e}{h\nu_P} P_P(z)\Gamma_P + \frac{\sigma_S^a + \sigma_S^e}{h\nu_S} P_S(z)\Gamma_S + A_{\text{core}}/\tau_{21}} N(r, \theta, z) \quad (5)$$

是上能级粒子浓度, 其中  $\nu_P$  和  $\nu_S$  分别是抽运光和信号光的光频率,  $h$  是普朗克常数,  $\tau_{21} = 840 \mu\text{m}$  为上能级粒子寿命,  $A_{\text{core}}$  是光纤纤芯横截面。

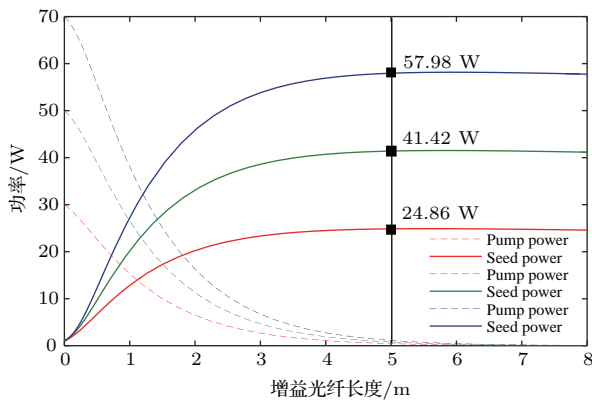


图9 不同抽运功率下第三级光纤放大的数值模拟

Fig. 9. Numerical simulation of pump power and seed power versus the gain fiber length with different initial pump power.

由于光纤放大器每级之间是熔接在一起的, 所以无法测量中间两级的输出功率, 本文只对第三级的抽运光功率和输出光功率的关系进行了理论计算. 由于第三级抽运光源打开之前, 输出光功率为 1 W, 因此设信号光经过前两级放大后功率为 1 W, 即  $P_S(0) = 1 \text{ W}$ , 分别令  $P_P(0) = 70, 50, 30 \text{ W}$ , 数值计算结果如图 9 所示. 可以看出, 增益光纤长度大于 5 m 后对信号放大不再有贡献, 所以该系统的最佳光纤长度为 5 m, 当抽运光为 70 W 时, 输出光功率超过 50 W, 与实验的输出功率 50.2 W 结果相符.

### 3.2 双频激光放大结果

当第三级放大的抽运光功率为 70 W 时, 输出双频激光功率为 50.2 W. 将该双频激光经过一系列准直和衰减进入 F-P 干涉仪, 得到双频波形如

图 10 所示. 图中双频峰值功率的比值在不同频差情况下发生变化, 是由于种子的双频成分之间存在增益竞争产生的此起彼伏. 事实上由于双频的两个频率非常接近, 它们在光纤中的增益几乎一致, 不存在增益竞争而引起的功率起伏, 实验中观察到放大后两个频率成分的功率比值与放大前相比没有变化.

50 W 的双频激光拍频信号如图 11 所示, 可以看出放大后的双频激光信噪比超过 40 dB.

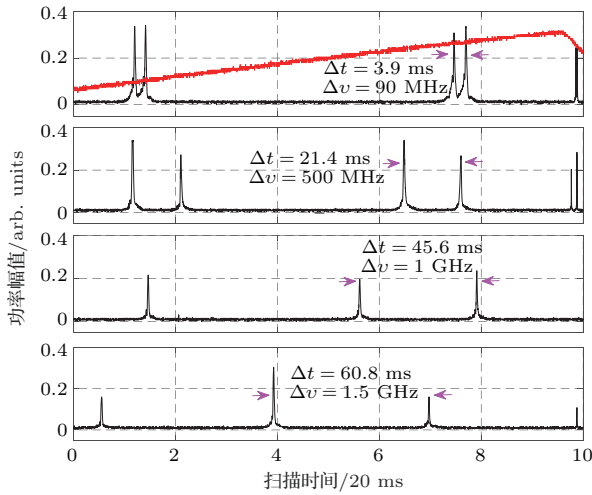


图 10 50 W 双频激光在不同频差下的示波器波形图  
Fig. 10. Amplified dual-frequency laser modes at different  $\Delta\nu$  shown on an oscilloscope.

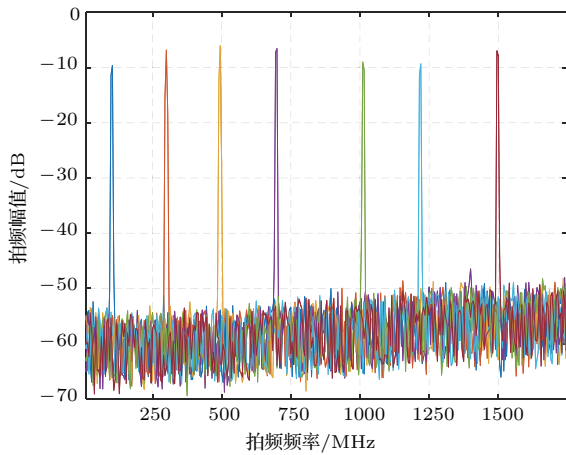


图 11 50 W 双频激光拍频信号的测量结果  
Fig. 11. Beat-note frequency of 50 W dual-frequency laser shown on spectrometer.

功率稳定性测量结果如图 12 所示, 在前 20 min 内输出光功率随着时间的增加从 50.2 W 逐渐下降到 49.3 W, 最后稳定在 49.3 W 和 49.4 W 之间, 测量功率的波动幅度在拟合值附近 0.1 W 范围内. 在功率测量的初始阶段, 由于增益光纤的温

度逐渐升高引起放大效率下降, 导致输出光功率减小, 当系统达到热平衡后, 测量结果趋于稳定. 实验过程中对增益光纤采取了风冷方式进行控温, 由于风冷装置的功率限制导致增益光纤与周围环境达到热平衡的时间较长.

同样, 实验测量了 50 W 双频激光在连续工作 20 min 内的频率稳定性, 如图 13 所示, 可以看出拍频信号的频率波动范围约为 8 MHz, 代入方差计算公式计算可得  $\sigma = 1.777$  MHz, 相对频率稳定性为 0.71%.

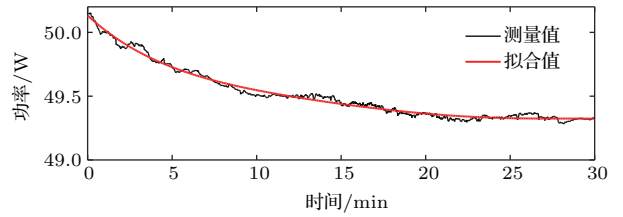


图 12 50 W 双频激光的功率稳定性测量

Fig. 12. Power stability at 50 W during 30 min.

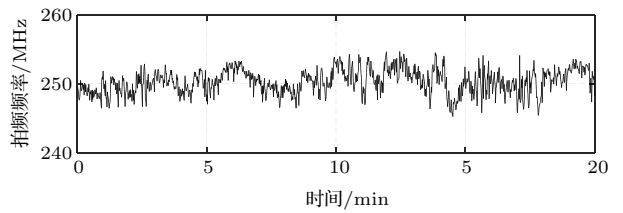


图 13 50 W 双频激光拍频信号的频率稳定性

Fig. 13. Beat-note frequency stability of 50 W DF laser during 20 min.

## 4 结 论

本文采用双频固体振荡器结合光纤功率放大器的方案, 实现了高功率宽调谐范围的射频强度调制的连续激光输出, 其中射频调制范围为 30 MHz—1.5 GHz, 最高输出功率 50 W, 双频信号的信噪比高于 40 dB. 若在双频激光源中加入自动控制环节进行线性调频, 则该光源可用于线性调频激光雷达系统中, 实现对远距离目标同时测速测距的功能; 若将高功率双频信号进行倍频, 则可实现宽带可调谐的 532 nm 强度调制激光输出, 用于水下探测及成像.

## 参考文献

[1] He Y, Wu J 1998 *Laser Optoelectr. Prog.* **35** 29 (in Chinese) [何毅, 吴健 1998 激光与光电子学进展 **35** 29]

- [2] Li Z G, Sun Z Z, Zhao Z L, Zhu X P 2016 *Laser & Infrared* **46** 1467 (in Chinese) [李志刚, 孙泽中, 赵增亮, 竹孝鹏 2016 激光与红外 **46** 1467]
- [3] Zheng Z, Zhao C, Zhang H, Yang S, Zhang D, Yang H, Liu J 2016 *Opt. Laser Tech.* **80** 169
- [4] Wang S, Yang S H, Wu X, Zhu Q H 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 084202
- [5] Pellen F, Jezequel V, Zion G, Jeune B L 2012 *Appl. Opt.* **51** 7690
- [6] Brunel M, Amon A, Vallet M 2005 *Opt. Lett.* **30** 2418
- [7] Maxin J, Molin S, Pillet G, Morvan L 2011 *IEEE Photon. Conference* **58** 479
- [8] Xing J H, Jiao M X 2015 *Acta Photon. Sin.* **44** 0214003 (in Chinese) [邢俊红, 焦明星 2015 光子学报 **44** 0214003]
- [9] Hu M, Zhang F, Zhang X, Zheng Y Y, Sun X, Xu Y X, Xu W Z, Ge J H, Xiang Z 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 1114003 (in Chinese) [胡淼, 张飞, 张翔, 郑尧元, 孙晓, 徐亚希, 许伟忠, 葛剑虹, 项震 2014 光学学报 **34** 1114003]
- [10] He T, Yang S, Zhao C, Zhang H, Liang Y, Kang Y 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 035101
- [11] Du W B, Leng J Y, Zhu J J, Zhou P, Xu X J, Shu B H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114203 (in Chinese) [杜文博, 冷进勇, 朱家健, 周朴, 许晓军, 舒柏宏 2012 物理学报 **61** 114203]
- [12] Huang L, Li L, Ma P, Wang X, Zhou P 2016 *Opt. Express* **24** 26722
- [13] Li J, Yang S, Zhao C, Zhang H, Xie W 2011 *Appl. Opt.* **50** 1329
- [14] Keller U, Knox W H, Roskos H 1990 *Opt. Lett.* **15** 1377
- [15] Draeger D 1971 *IEEE J. Quantum Elect.* **7** 300
- [16] Tang C L, Stutz H, Demars G 1963 *J. Appl. Phys.* **34** 2289
- [17] Cheng L J, Yang S H, Zhao C M, Zhang H Y 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 0714002 (in Chinese) [程丽君, 杨苏辉, 赵长明, 张海洋 2017 光学学报 **37** 0714002]
- [18] Wiesenfeld K, Bracicowski C, James G, Roy R 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 1749
- [19] Park J D, McKay A M, Dawes J M 2009 *Opt. Express* **17** 6053
- [20] Leng J Y, Wu W M, Chen S P, Hou J, Xu X J 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0606007 (in Chinese) [冷进勇, 吴武明, 陈胜平, 侯静, 许晓军 2011 光学学报 **31** 0606007]

# High-power wideband radio-frequency intensity modulated continuous wave laser\*

Cheng Li-Jun<sup>1)</sup> Yang Su-Hui<sup>1)2)†</sup> Zhao Chang-Ming<sup>1)</sup> Zhang Hai-Yang<sup>1)</sup>

1) (School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronics Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China)

( Received 11 September 2017; revised manuscript received 11 October 2017 )

## Abstract

A high-power wideband radio-frequency (RF) intensity modulated continuous wave light source is demonstrated. The high-power dual-frequency light source is obtained via a dual-frequency laser signal seeding fiber power amplifier. A diode laser pumped dual-frequency laser is built as the seed and a diode laser pumped three-stage Yb<sup>3+</sup> doped large mode area fiber power amplifier is used to enhance the output power to 50 W. In the dual-frequency seed laser, a coupled cavity composed of the Nd:YAG gain crystal and output coupler is used as the mode selector and enforces single longitude mode to oscillate. Two quarter wave plates are inserted in the laser cavity to lift the frequency degeneration of the two orthogonally polarized modes. By changing the angle between the fast axes of the two quarter wave plates, the frequency difference between the two orthogonally polarized modes can be tuned from 30 MHz to 1.5 GHz. The standard difference of beat frequency is 1.6144 MHz and stability is 1.52% when a frequency difference of output dual-frequency laser is 250 MHz. This stable dual-frequency seed signal is amplified via a diode pumped Yb<sup>3+</sup>-doped fiber power amplifier. In order to suppress amplified spontaneous emission and other nonlinear effects, a three-stage fiber amplification system is used. The first stage is a diode pumped fiber (5 m, 6/125  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.13$ ) power amplifier. The pump power is fixed at 600 mW. The input dual frequency signal is 3.2 mW, and it is amplified to several hundred mW by the first fiber power amplifier. The second fiber amplifier is a diode laser pumped fiber (5 m, 10/125  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.075/0.46$ ) amplifier. The pump power is fixed at 10 W, and the dual frequency signal is amplified to sub watts after the second fiber amplifier. A 5 m large mode area fiber (25/250  $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.065/0.46$ ) is used in the final amplification. A maximum amplified power of 50.2 W is obtained when the pump power is 70 W in the experiment. The signal-to-noise ratio of the beat note increases from 25 dB to 40 dB via amplification. The output power fluctuation of the amplified signal at 50 W is smaller than 0.1 W during 30 min. The RF frequency stability is well maintained during the amplification, and the beat-note frequency instability is 1.777 MHz. This high-power dual-frequency light source with wide beat note frequency bandwidth has potential applications in dual-frequency coherent lidar system for long distance ranging and imaging or underwater detections after the frequency has been doubled to 532 nm.

**Keywords:** optically carried radio-frequency signal, fiber power amplifier, high power, widely tunable

**PACS:** 42.55.Rz, 07.60.Vg

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172017

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275053, 61741502).

† Corresponding author. E-mail: [suhuiyang@bit.edu.cn](mailto:suhuiyang@bit.edu.cn)