

结合二维分光光谱仪与可调谐法布里-珀罗干涉仪的 超高分辨率光谱测量技术研究

柳文娟 胡澄之 姜培培 吴波 沈永行

浙江大学光电系, 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 提出并实验演示了一种新型的超高分辨率光谱测量技术, 通过将二维分光的高分辨率面阵光谱仪和可调谐法布里-珀罗(F-P)干涉仪相结合来实现超高分辨率的光谱测量, 其中高分辨率面阵光谱仪的分辨率优于可调谐F-P干涉仪的自由光谱范围(FSR)。所采用的可调谐F-P干涉仪光谱范围为780~840 nm, FSR为3.75 GHz, 精细度大于100。利用虚拟成像阵列和平面衍射光栅构建了二维分光面阵光谱仪, 实现了17.4 nm(792~809.4 nm)光谱范围内0.7 GHz的光谱分辨率, 分辨率值高于可调谐F-P的FSR。二者的结合实现了优于37.5 MHz的超高光谱分辨率。利用所构建的光谱仪实际测量了锁模钛宝石激光器的激光光谱, 证实可以较为清晰地分辨其间隔为76.3 MHz的各个纵模。

关键词 光谱学; 高分辨率测量; 虚拟成像阵列; 可调谐法布里-珀罗; 面阵光谱仪

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0630007

Ultra-High-Resolution Spectrometry Incorporating Two-Dimension Dispersing Spectrometer and Tunable Fabry-Perot Filter

Liu Wenjuan Hu Chengzhi Jiang Peipei Wu Bo Shen Yonghang

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A new method for hyperfine spectrum measurement is mentioned and experimentally demonstrated. Ultra-high-resolution spectrometry is obtained through incorporating a two-dimensional (2-D) dispersing CCD spectrometer and a tunable Fabry-Perot (F-P) filter and the spectral resolution of the 2-D dispersing CCD spectrometer is better than that of the tunable F-P filter. The F-P scanning interferometer covers a wavelength range of 780~840 nm with a free spectral range (FSR) of 3.75 GHz and a fineness of 100. With the use of 2-D dispersing CCD spectrometer consisting of a virtually-imaged phased-array (VIPA) and a diffraction grating, real-time high-resolution spectral measurement has been realized in a wide spectral range. Resolution as high as 0.7 GHz obtained with the 2-D dispersing CCD spectrometer in a spectral range of 17.4 nm (792~809.4 nm), is higher than that of the tunable F-P filter. By combining the 2-D spectrometer with a tunable F-P based scanning interferometer, hyperfine spectral resolution higher than 37.5 MHz is achieved. The laser spectrum of the mode-locked Ti:sapphire laser is measured with the spectrometer, proving that its longitudinal mode with the spacing of 76.3 MHz can be distinguished clearly.

Key words spectroscopy; high-resolution measurement; virtual-image phase-array; tunable Fabry-Perot; array detector-based spectrometer

OCIS codes 300.6360; 300.6190; 300.6320; 300.6390

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(11304277、61405174)

作者简介: 柳文娟(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光谱仪方面的研究。E-mail: skybblu@163.com

导师简介: 沈永行(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事高功率脉冲光纤激光器、可调谐光纤激光器、高功率中红外激光器及光纤传感器等方面的研究。E-mail: physyh@zju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

光谱测量在人类生活的方方面面具有重要应用,高分辨率光谱测量更是具有重要价值,因此多种类型的高分辨率光谱仪器已被提出。目前商业上较多为扫描式光谱仪和阵列式光谱仪,此外还有基于干涉原理的傅里叶光谱仪^[1],基于激光扫描测量的激光光谱仪^[2]。相比于扫描式光谱仪,阵列式光谱仪具有结构稳定、光谱重复性好、测量光谱范围大、测试时间短等诸多优点,因而受到研究者的青睐。由于面阵式探测器像元数(数十万个)远高于线阵式探测器像元数(数千个),如能实现均匀色散分光,面阵式光谱仪有望获得远比线阵式光谱仪更高的光谱分辨率。阶梯光栅光谱仪的商用标准分辨率为0.008 nm,最高分辨率小于0.005 nm(在200 nm处)^[3-4]。

另一种基于虚拟成像阵列(VIPA)和光栅的二维(2-D)面阵光谱仪光谱分辨率可达1 GHz(在800 nm处等效于0.002 nm)。VIPA是一种新型的高色散元件,由两个高度平行的平面组成,入射面上大部分区域镀上全反射膜,并留有一小段窗口镀上高透膜或不镀膜作为入射窗;出射面上整面镀上一层高反膜。早期VIPA的应用并不广泛^[5-7],直到2004年Xiao等^[8]将VIPA与光栅结合起来,成功解决了VIPA多级衍射叠加的问题,使得VIPA能较好地应用于高分辨率光谱处理技术^[9-12]。

在大气压下,许多气体中波红外波段的本征吸收峰压力增宽谱线的-3 dB线宽都达到几百兆赫兹的量级,并具有很大的谱线吸收强度。因此,能够同时实现数十纳米带宽的测量范围和优于100 MHz的高光谱分辨率的新型光谱测量仪器具有非常重要的应用价值。显然,单纯利用上述二维面阵光谱仪还很难实现超越100 MHz的光谱分辨率。目前,国际上用其配合光梳来进行高精度测量,一般需要将光梳的重复频率增加到数个千兆赫兹以上^[10]。为适应高分辨率光谱测量的应用要求,并摆脱对结构复杂的光梳系统的依赖,在基于VIPA和光栅的二维面阵探测器光谱仪基础上,提出将其与可调谐F-P相结合的技术方案。配合适当的激光光源(无纵模激光光源),就可以实现对气体成分的精确测量。本文演示了利用二维面阵光谱仪在近红外波段获得0.7 GHz(在800 nm处等效于1.5 pm)的高光谱分辨率,并通过与可调谐F-P相结合,获得了优于37.5 MHz(在800 nm处等效于0.08 pm)的超高光谱分辨率。

2 实验装置

2.1 基本方案

超高分辨率光谱仪采用可调谐F-P串接二维阵列探测器光谱仪的技术方案,如图1所示。其中,可调谐F-P的光谱覆盖范围超过光谱仪的光谱覆盖范围;二维分光阵列式探测器光谱仪的光谱分辨率优于可调谐F-P的自由光谱范围。经由可调谐F-P输出的宽带待测光谱就变成一个类似于光梳的梳状光谱,而每一支梳的光波长和光强度可由后端的二维面阵式光谱仪直接给出。

通过逐步改变加在可调谐F-P上的电压,可以逐步扫描从可调谐F-P滤波器输出的梳状光谱的位置。如果电压扫描步距足够小,且加在可调谐F-P滤波器上的电压变化范围超过一个自由光谱范围(FSR)对应的电压范围,F-P输出的梳状光谱就相应地完整扫过了整个待测量的光谱区间。通过改变F-P的电压并同步记录所测量得到的所有电压下的各个梳状光谱,就可以利用数据整合得到完整的高分辨率待测光谱。此时,可调谐F-P的光谱分辨率即为整个光谱仪系统的光谱分辨率,可用 f_{FSR}/F 来衡量,其中 F 为可调谐F-P腔的精细常数。理论上,对于一个 $F=100$ 的可调谐F-P扫描干涉仪,覆盖一个FSR的扫描电压的细分步数只要超过100,就可以实现对整个光谱范围的完整覆盖。

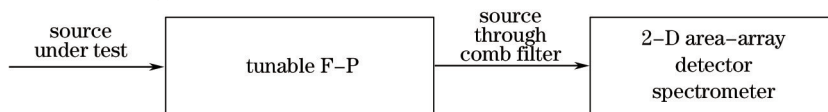


图1 超高分辨率光谱仪原理方案示意图

Fig.1 Principle diagram of the ultra-high spectral resolution spectrometer

2.2 系统设计

图2为根据图1设计的超高分辨率光谱仪系统的结构原理图。其中,左边为可调谐F-P部分,右边为二维面阵光谱仪部分。以锁模输出的钛宝石激光器作为待测光源,中心波长约为800 nm,重复频率为76.3 MHz(在800 nm处等效于0.16 pm)。该激光光源经过可调谐F-P滤波后,在二维面阵光谱仪部分实时成像在CCD上。实验中,为便于调试和集成,上述两个部分通过HP-780单模光纤衔接过渡。

在可调谐 F-P 部分,采用可调谐共焦 F-P 扫描干涉仪进行扫描滤波^[13]。前一个透镜组主要用于将入射光聚焦到可调谐 F-P 的共焦腔中,更好地进行腔模匹配;引入后一个透镜组主要是用于将从可调谐 F-P 输出的光耦合到光纤中去,提高光耦合效率。实验中,采用由锯齿波发生器控制的 AFP-780 共焦球面扫描干涉仪, F 优于 100, $f_{\text{FSR}}=3.75$ GHz, 一个 FSR 对应的电压改变量为 30 V。因此,如 2.1 所述,如果后端的二维面阵光谱仪的分辨率优于可调谐 F-P 的 FSR,所构建的整个超高分辨光谱仪系统实际可达到的光谱分辨率可优于 37.5 MHz。

在二维面阵光谱仪部分,采用基于 VIPA 和光栅的二维面阵光谱仪。从可调谐 F-P 部分出射的信号光由单模光纤(HP-780)输出,经准直扩束后变成一束光斑直径约 16 mm 的平行光。该平行光通过柱面透镜($f_c=300$ mm)会聚成一个沿 y 方向的线状光斑,并投射在 VIPA 的入射窗口上。VIPA 两个反射面分别镀有在 780~840 nm 范围内的高反膜($r_1=98.5\%$, $r_2=96.0\%$),自由光谱范围为 33.3 GHz,在 z 方向以约 3° 角倾斜。入射光束经 VIPA 在 x 方向色散开,并以 16.5° 的入射角入射到一块平面闪耀光栅(1200 lp/mm)上,在 y 方向上产生色散。经过 VIPA 和光栅交叉色散的入射光,经聚焦透镜($f=300$ mm)后成像到 CCD 接收面上,并通过计算机终端的图像采集卡接收并处理。CCD 像元数量为 780 pixel \times 582 pixel,像元尺寸为 $8.3 \mu\text{m}\times 8.3 \mu\text{m}$ 。在 CCD 前 80 mm 处插入的柱面透镜($f_c=300$ mm)主要用于补偿像散^[14-15]。二维面阵光谱仪的光谱分辨率主要由 VIPA 决定,理论计算可达 0.6 GHz (在 800 nm 处等效于 1.3 pm)^[8,16](实验测试值为 0.7 GHz,略逊于理论计算值),远高于可调谐 F-P 的 FSR(3.75 GHz)。

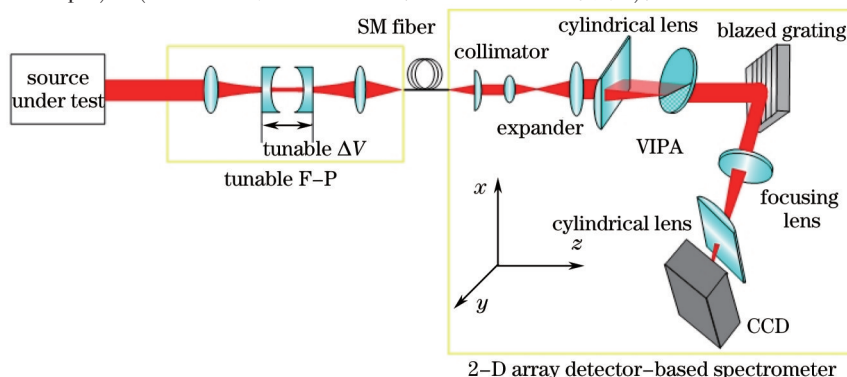


图 2 结合二维分光面阵光谱仪和可调谐 F-P 的高分辨率光谱仪实验装置图

Fig.2 Setup of the experimental high-resolution spectrometer incorporating the 2-D dispersing spectrometer and the tunable F-P filter

2.3 谱图分析方法

图 3(a)从原理上展示了一个宽带光源经过二维分光后在 CCD 上的光谱分布示意图。由 VIPA 色散产生的众多光谱级次重叠在一起,需要通过光栅将其在 y 方向上展开。可以看出,波长沿着 x 方向递减,沿着 y 方向递增, $\lambda_n - \lambda_{n-1} = \lambda_{\text{FSR,VIPA}}$ ($n=2,3,\dots$)。为了使色散后的光谱分布与 CCD 的像元分布相匹配,将 CCD 绕 z 方向旋转 2° ^[17]。使用尾纤输出的激光二极管(LD,中心波长为 800 nm)对二维面阵光谱仪进行调试,得到如图 3(b)所示的激光光谱图样。由于 CCD 的高度是有限的,在 CCD 上只能观测到 4 个相似的光谱图样,代表 4 个依次错开 $\lambda_{\text{FSR,VIPA}}$ 的光谱。实验中需要通过叠加这四段光谱来提高测量精度^[18-19]。

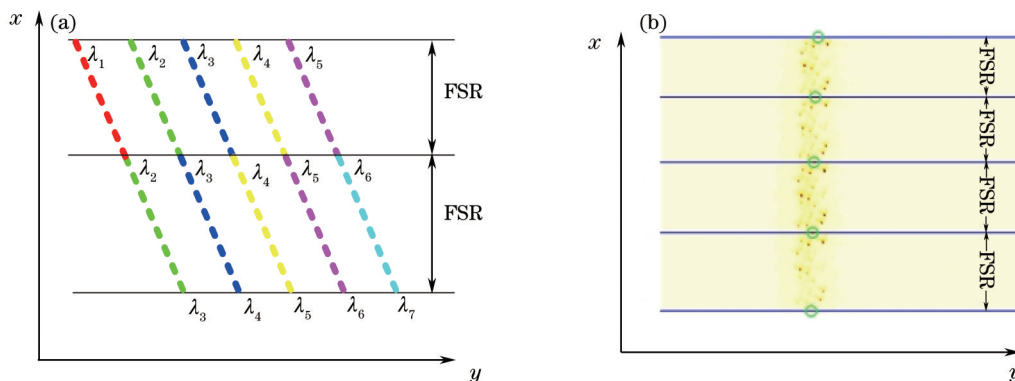


图 3 CCD 上光谱图样示意图。(a) 二维光谱的理论空间分布图;
(b) 在无可调谐 F-P 滤波情况下二维光谱仪测量 LD 出射激光光斑分布

Fig.3 Spectral patterns on CCD. (a) Schematic spatial arrangements of the 2-D dispersed spectrum in theory;
(b) density distribution image when the laser from a LD goes through the 2-D dispersing spectrometer without the tunable F-P filter

3 实验结果及分析

为初步展示系统的光谱测量能力,在可调谐F-P部分和二维面阵光谱仪部分之间的耦合光纤中接上了一个中心波长为800.550 nm、半峰全宽为0.26 nm的光纤光栅进行测量。

实验中,分别测试两种工作模式下的激光光谱。第一种模式下,锯齿波发生器的扫描频率设定为 $f=100$ Hz, F-P的扫描速度远快于CCD单帧曝光速度;第二种模式下, F-P上的电压分步逐渐提升,步进周期远大于CCD的单帧曝光时间,电压步进间距为 $\Delta U=0.2$ V。

3.1 两种模式下的光谱对比

第一种模式下的光谱如图4所示。此时,每一帧CCD上的图像包含了扫描经过的所有电压对应的光谱分布,实际结果类似于没有经过可调谐F-P的滤波,因此获得的是待测光源的全部光谱。另外,不同时刻CCD图像对应的光谱基本相同,这与上述分析相符。图4(a)给出了CCD记录的光斑分布图。由于二维面阵光谱仪的光谱分辨率只有0.7 GHz,远超钛宝石激光器的重频,因此在该模式下无法分辨钛宝石激光器锁模时的各个纵模。图4(b)展示的是单帧CCD采集图像所得到的光谱,图4(c)为多帧CCD采集图像叠加后的光谱,图4(d)为经过数值滤波后的光谱图。理论上,图4(b)和4(c)展示的光谱分辨率约为0.7 GHz(在800 nm处等效于1.5 pm),图4(d)对应的光谱分辨率则略微降低。可以发现,经过叠加处理和数值滤波处理后光谱的信噪比有显著改善。

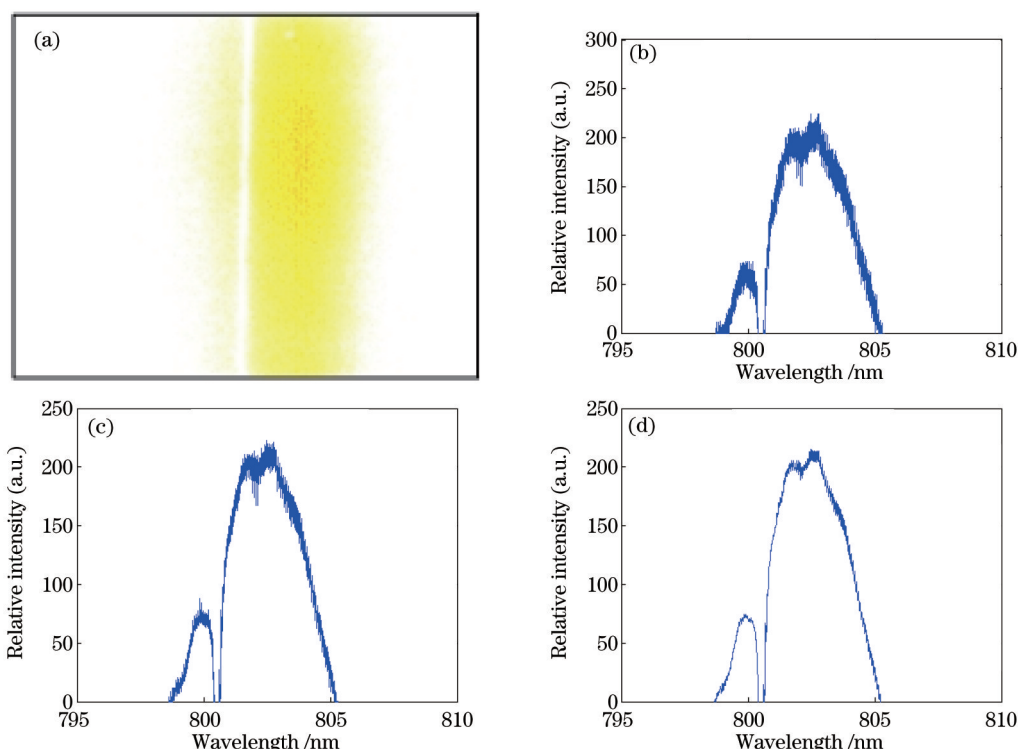


图4 扫描频率 $f=100$ Hz工作模式下得到的光斑分布和光谱图。(a) CCD直接得到的光斑分布;(b) 对应光斑分布的光谱测量曲线;(c) 多帧CCD采集图像叠加后的光谱;(d) 经过数值滤波后的光谱图

Fig.4 Density distribution image and spectrograms in the working mode of scanning frequency $f=100$ Hz.

(a) Density distribution image directly recorded by CCD; (b) measured spectral curves corresponding to the density distribution image;

(c) spectral curve by adding multiple-frame images recorded by CCD; (d) spectral curve through numerical filtering

图5给出了第二种模式下三个不同电压($U=0$ V, 2 V, 4 V)对应的光谱分布,左边是单帧CCD上的光斑图样,右边是对应于光斑图样的光谱曲线。该模式下,由于可调谐F-P的滤波作用,每一帧CCD图像仅对应可调谐F-P的一个状态,只有满足一定波长谐振条件的光谱被透射出来,因此只有较少的波长成分成像在CCD上,CCD上的光斑呈现点状分布,对应不同的梳状光谱的各支梳成分。可以发现,在不同电压下光谱及其对应的光斑分布变化十分明显。

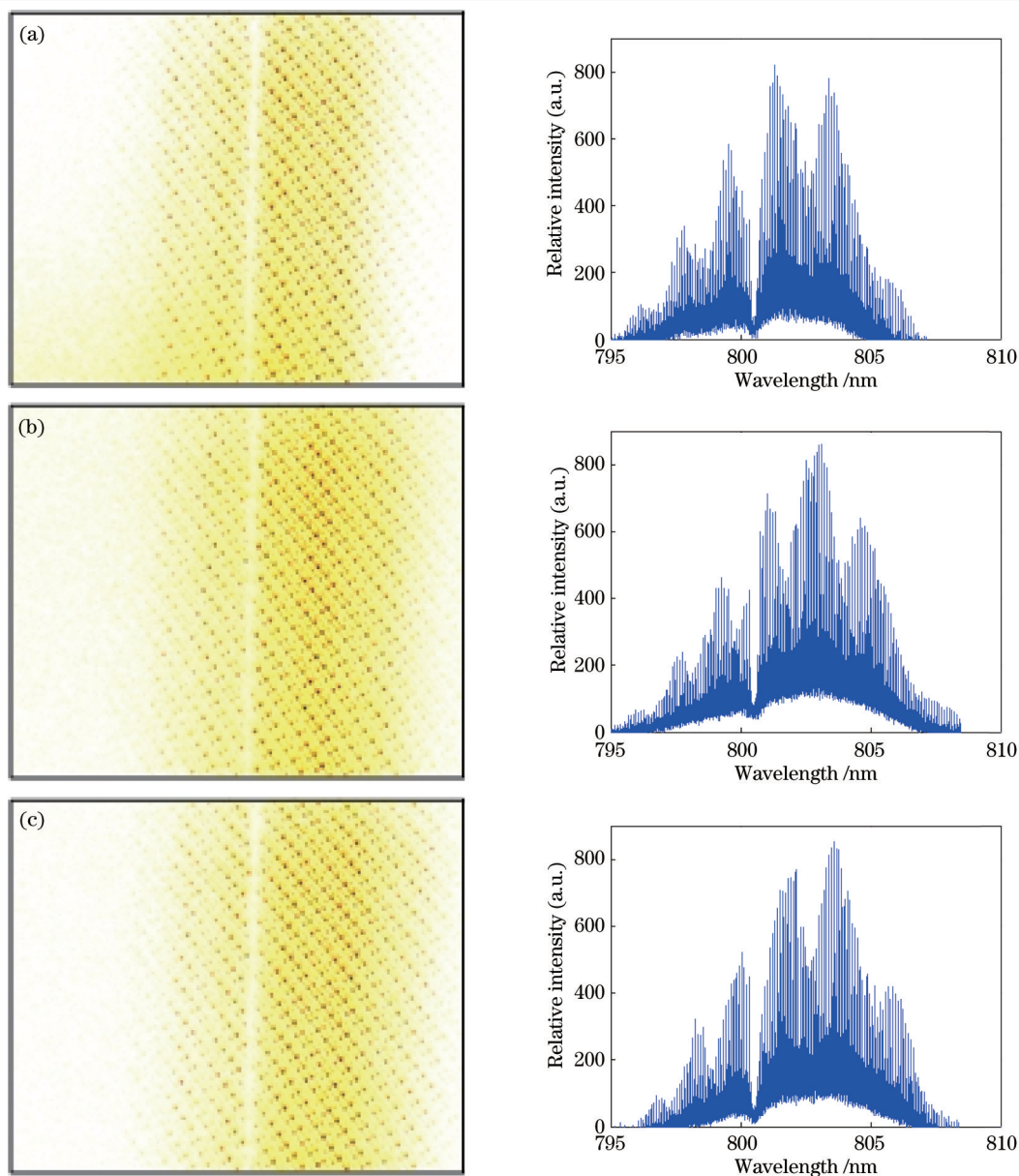


图5 在F-P上电压单步改变情况下获得的光谱图。左: CCD直接得到的光斑分布; 右: 对应光斑分布的光谱测量曲线。
对应的F-P电压为(a) $U=0$ V; (b) $U=2.0$ V; (c) $U=4.0$ V

Fig.4 Spectrograms in the situation of changing the voltage applied onto the F-P step by step. Left: density distribution images and spectrograms directly recorded by CCD; right: measured spectral curves corresponding to the density distribution image.
Corresponding voltage applied onto the F-P (a) $U=0$ V; (b) $U=2.0$ V; (c) $U=4.0$ V

3.2 结果分析

对0~30 V电压区间扫描得到的所有 CCD 图像对应的光谱进行叠加处理,如图6所示。其中,直接叠加得到的平均光谱曲线如图6(a)所示;利用电压与波长的对应关系,按光谱波长错位后步进叠加得到的光谱曲线如图6(b)所示;图6(c)为图6(b)中标示圆形区域的细分光谱。从图6(c)中可以看出,钛宝石激光器的模式基本能够被探测出来,并且其光谱峰值间隔基本对应钛宝石激光器模式间隔。

图中可以看出各个纵模的强度变化较大,这与锁模激光器的实际情况有所不同。造成这一差别的主要原因是F-P上的步进电压间距不够精细,每一个激光纵模落在F-P的光谱通带函数上的位置不尽相同,其透射率也有所不同,导致各个纵模强度表面上看不均匀,与实际情况有差别。这一问题也是光梳激光采用可调谐F-P增频时常遇到的,理想的处理办法是加锁频跟踪系统,这需要在后续的测量中加以解决。但是,所述的超高分辨率光谱仪系统,如果测量采用的光源是一个无纵模结构的连续谱激光光源(如 ASE 光源),这一问题将不复存在。

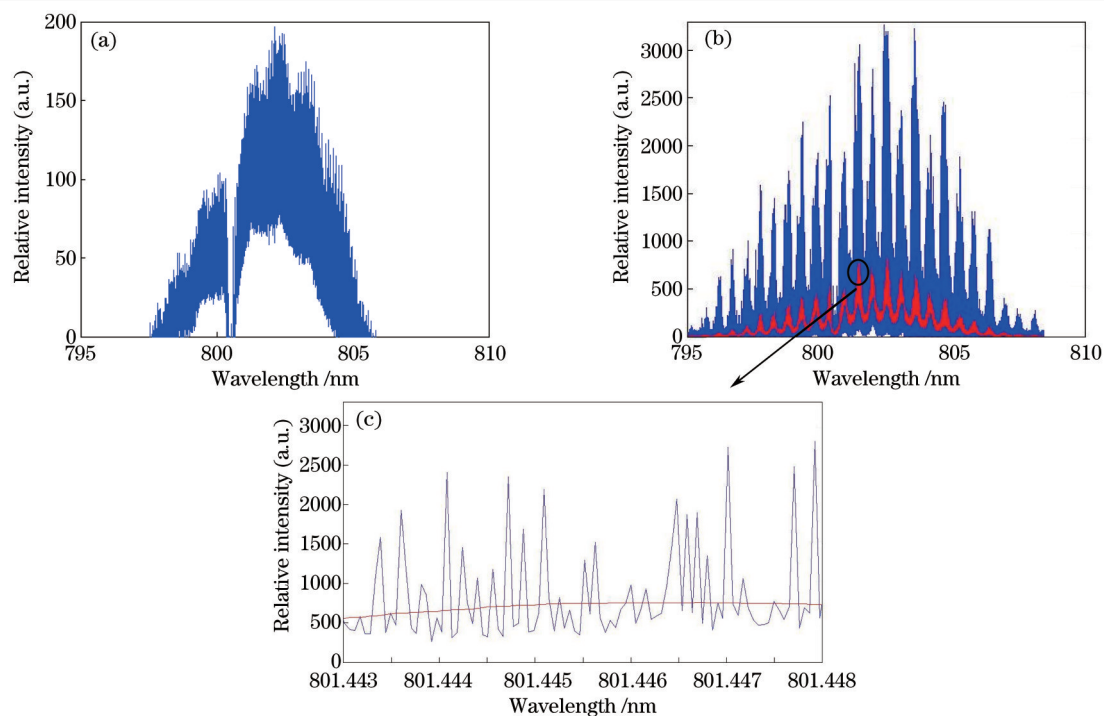


图6 0~30 V电压下叠加处理后的光谱曲线。(a) 直接叠加时的平均光谱曲线;(b) 光谱步进错位叠加后的光谱曲线, 其中蓝线表示直接叠加所得的光谱, 红线是由蓝线进行平滑后得到的光谱;(c) 图6(b)中圆形区域的局部细分光谱图

Fig.6 Spectral curves with the overlay treatment under the voltage of 0~30 V. (a) Averaged spectral curve with direct superposition; (b) spectral curve with stepping displacement superposition, and the blue line stands for the spectrum with direct superposition while the red line stands for the spectrum produced by smoothing the blue line; (c) detail with enlarged scale of circular region of Fig.6(b)

4 结 论

提出并实验演示了一种新型的超高分辨率光谱测量技术。实验证实,通过将VIPA和衍射光栅二维分光的高分辨率面阵光谱仪和可调谐F-P干涉仪相结合,可以实现超高分辨率的光谱测量。实验系统中,所构建的高分辨率面阵光谱仪的分辨率为0.7 GHz,优于可调谐F-P干涉仪的自由光谱范围(FSR, 3.75 GHz)。因此,二者的结合实现了优于37.5 MHz的超高光谱分辨率测量,利用所构建的超高分辨率光谱仪实际测量了锁模工作的钛宝石激光器的激光光谱,证实其可以较为清晰地分辨其间隔为76.3 MHz的各个纵模。所述系统,如结合一个无纵模的激光光源,可以用于超高分辨率的气体光谱测量,因此后续工作中通过光谱测量波段的拓展,如采用中波红外波段的焦平面阵列器件和中波红外波段的可调谐F-P干涉仪,可以实现中波红外波段的超精细光谱测量,具有重要的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222006.
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222006.
- 2 Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurement based on LabVIEW[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0115003.
龙精明, 周卫东, 吴志伟. 基于LabVIEW的气体高分辨率光谱探测系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0115003.
- 3 Ning Chunli, Qi Xiangdong, Chen Shaojie, *et al.* Optical design and performance analysis of light and small echelle spectrograph[J]. *Spectrosc & Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3406-3410.
宁春丽, 齐向东, 陈少杰, 等. 轻小型中阶梯光栅光谱仪光学设计及性能分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3406-3410.
- 4 Chen Shaojie, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.* Efficient algorithms for echelle spectrograph and cross-dispersed spectral analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001.

- 陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1030001.
- 5 M Shirasaki. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer[J]. Opt Lett, 1996, 21(5): 366–368.
- 6 Shijun Xiao, A M Weiner, C Lin. A dispersion law for virtually imaged phased-array spectral dispersers based on paraxial wave theory[J]. IEEE J Quantum Electron, 2004, 40(4): 420–426.
- 7 A Vega, A M Weiner, C Lin. Generalized grating equation for virtually-imaged phased-array spectral dispersers[J]. Appl Opt, 2003, 42(20): 4152–4155.
- 8 Shijun Xiao, A M Weiner. 2-D wavelength demultiplexer with potential for ≥ 1000 channels in the C-band[J]. Opt Express, 2004, 12(13): 2895–2902.
- 9 Chen Zhiwei, Tan Zhongwei. High-resolution demodulation for fiber grating sensors based on based on virtually-imaged phased array[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422003.
- 陈志伟, 谭中伟. 基于虚像相位阵列的高分辨率光纤光栅传感解调[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422003.
- 10 S A Diddams, L Hollberg, V Mbele. Molecular fingerprinting with the resolved mode sofa femtosecond laser frequency comb[J]. Nature, 2007, 445(7128): 627–630.
- 11 K Goda, K K Tsia, B Jalali. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena[J]. Nature, 2009, 458(7242): 1145–1149.
- 12 V R Supradeepa, Chenbin Huang, D E Leaird, *et al.*. Femtosecond pulseshaping in two dimensions: towards higher complexity optical waveforms[J]. Opt Express, 2008, 16(16): 11878–11887.
- 13 M Hercher. The spherical mirror Fabry-Perot interferometer[J]. Appl Opt, 1968, 7(5): 951–966.
- 14 K S Lee, K P Thompson, J P Roll. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. Opt Express, 2010, 18(22): 23378–23384.
- 15 M McDowell. Design of Czerny-Turner spectrographs using divergent grating illumination[J]. Optica Acta: International J Optics, 1975, 22(5): 473–475.
- 16 A M Weiner. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. Rev Sci Instrum, 2000, 71(5): 1929–1960.
- 17 S X Wang, Shijun Xiao, A M Weiner. Broadband, high spectral resolution 2-D wavelength-parallel polarimeter for dense WDM systems[J]. Opt Express, 2005, 13(23): 9374–9380.
- 18 Chuan Wang, Zihua Ding, Shengtao Mei, *et al.*. Ultralong-range phase imaging with orthogonal dispersive spectral-domain optical coherence tomography[J]. Opt Lett, 2012, 37(21): 4555–4557.
- 19 Wen Bao, Zihua Ding, Peng Li, *et al.*. Orthogonal dispersive spectral-domain optical coherence tomography[J]. Opt Express, 2014, 22(8): 10081–10090.

栏目编辑: 何卓铭