

# 光纤四通道双平衡外差相位检测实验研究

施剑波<sup>1,2</sup>, 张娟<sup>1\*\*</sup>, 刘德安<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部级共建国家重点实验室培育基地, 上海 200444;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 为实现高灵敏度的外差相位检测, 提出了一种基于光外差检测原理的光纤四通道双平衡外差相位检测方法。搭建光纤四通道双平衡外差检测光路, 采用 1/4 波片作为相位检测样品, 验证分析了光纤四通道双平衡外差相位检测的性能。分析了外差检测中信号调制频率对相位测量结果的影响, 结果表明受限于光电接收器件的响应带宽, 过高或过低的调制频率均不能有效检测到相位信息。在实验中, 最优的信号调制频率范围为 500.5 ~ 1550.5 kHz, 实际测得的相位均方根为 89.1°, 标准差为 0.3°。在此基础上, 分析了双平衡外差干涉中光纤分束比以及耦合透镜的有效接收口径效应对相位检测的影响。当光纤分束比接近 1:1 时, 得到了较高信噪比下更加精确的检测结果; 通过改变耦合透镜的发射角, 验证了有效接收口径对接收信号灵敏度的实际影响。

**关键词** 测量; 外差检测; 四通道双平衡探测; 电光调制; 相位检测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0904005

## Fiber-Optic Four-Channel Dual-Balanced Heterodyne Phase Detection

Shi Jianbo<sup>1,2</sup>, Zhang Juan<sup>1\*\*</sup>, Liu Dean<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>National Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** This study proposes a fiber-optic four-channel dual-balanced heterodyne phase detection method based on optical heterodyne detection principle to realize high-sensitivity heterodyne phase detection. A fiber-optic four-channel dual-balanced heterodyne detection optical path is experimentally established, and a quarter-wave plate is used as a phase detection sample to verify the detection performance. Further, the influence of the signal modulation frequency on the phase measurement result in heterodyne detection is analyzed. Results reveal that the phase information cannot be effectively detected by too high or too low modulation frequency due to the limitation of the response bandwidth of the photodetector. Fiber splitting ratio in double-balanced heterodyne interference and the effect of the effective receiving aperture of the coupling lens on phase detection are analyzed based on the optimal signal modulation frequency of 500.5-1550.5 kHz and the actual measured phase root-mean-square of 89.1° with a standard deviation of 0.3°. When the fiber splitting ratio is approximately 1:1, a more accurate detection result with a higher signal-to-noise ratio is obtained. The actual influence of the effective receiving aperture on the sensitivity of the received signal is verified by varying the emission angle of the coupling lens.

**Key words** measurement; heterodyne detection; four-channel dual-balanced detection; electro-optic modulation; phase detection

**OCIS codes** 120.5050; 040.1880; 060.4080; 140.3510; 350.5030

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-04-28; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11774364)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1425900)

\* E-mail: liudean@siom.ac.cn; \*\* E-mail: juanzhang@staff.shu.edu.cn

# 1 引 言

利用声光、电光等技术对光学信号频率进行调制,构成了多种外差干涉技术,在光电精密测量领域可用于相位或者振幅的检测。该激光外差干涉测量技术响应速度快,测量范围大,信噪比高,在微小振幅测量<sup>[1-3]</sup>、表面等离子体共振引起的相位变化的测量<sup>[4-7]</sup>、非线性误差的研究<sup>[8-9]</sup>以及快速测量<sup>[10]</sup>等方面有着广泛的应用。为了研究外差干涉系统的相位特性,文献<sup>[11]</sup>中采用共线对称空间光路进行检测,减弱了外界环境对检测的影响。用于光功率测量的超灵敏外差检测技术,在高动态范围和高灵敏度的光学透射率测量方面得到很好的应用<sup>[12-13]</sup>。

为消除基频信号对上述光学外差信号的影响,实现更加快速的光学信号解调,文献<sup>[14]</sup>中提出了一种基于四通道自校准的平衡外差探测技术。该技术的核心是实现四路 90°相移,并直接对光电接收的调制信号进行解调,该方法比直接探测方法的检测精度高出 2 个数量级。但由于该方法是基于空间器件的光路,对大气和温度等外界扰动非常敏感,特别是对相位测量系统的精确度和重复性影响严重。因此,克服外界扰动,发展更加稳定的光学外差接收系统对精密测量具有更加重要的实际应用价值。

本文提出了基于光纤四通道双平衡外差相位检测的实验方案,主要采用光纤传输方式进行双平衡探测,以减小空间传输过程中周围环境扰动产生的影响,并运用双平衡外差接收以降低本振光自身产

生的强度过剩噪声和散粒噪声的影响,为更加稳定、便捷的外差相位检测提供了重要的实现途径。基于光纤器件搭建了四通道双平衡外差相位检测实验光路,从理论上推导了基于光纤四通道双平衡外差相位检测技术的原理,通过实验分析了调制频率、光纤分束比和接收口径效应对相位检测的影响。

## 2 光纤四通道双平衡外差相位检测

### 2.1 光纤四通道双平衡外差相位检测原理

光纤四通道双平衡外差相位检测原理如图 1 所示,该装置由激光光源(LD)、光纤分束器(OFS)、透镜光纤(LF)、偏振片(P)、待测样品(O)、电光调制器(EOM)、光纤耦合器(OFC)、2×4 光纤桥接器(OH;2 个输入端、4 个输出端)、两个平衡外差探测器(BHD)和示波器(OSC)组成。频率为  $\omega_L$  的激光光源输出的光束经过光纤分束器后分成两束光,其中一束作为信号光束,另一束作为参考光束。信号光束经过透镜光纤准直后到达偏振片,经偏振片偏振调制后的光束再经电光调制器调制频率后至 2×4 光纤桥接器;参考光束经过光纤传输至 2×4 光纤桥接器。信号光束经过电光调制器后,频率为  $\omega_S$ 。参考光束  $E_L(t)$  和混频之前的信号光束  $E_S(t)$  的光场表达式分别为

$$E_L(t) = E_L \exp(i\omega_L t), \quad (1)$$

$$E_S(t) = E_S \exp[i(\omega_S t + \varphi_S)], \quad (2)$$

式中:  $E_L$  和  $E_S$  分别为参考光束和信号光束的振幅;  $\varphi_S$  为待测样品的相位;  $t$  为时间。

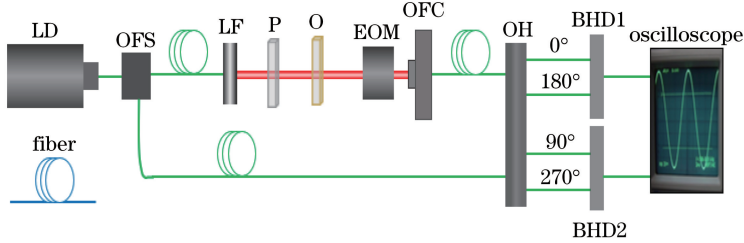


图 1 光纤四通道双平衡外差相位检测示意图

Fig. 1 Schematic of fiber-optic four-channel dual-balanced heterodyne phase detection

信号光束和参考光束分别注入 2×4 光纤桥接器中的两个输入端,通过混频效应得到 4 束相移分

别为 0°、90°、180°、270°的光束,被探测器所接收,在光电二极管上得到的 4 束光的光电流分别为

$$I_0 = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_L|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_L| \cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S], \quad (3)$$

$$I_{180} = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_L|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_L| \cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S - \pi], \quad (4)$$

$$I_{90} = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_L|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_L| \cos\left[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S - \frac{1}{2}\pi\right], \quad (5)$$

$$I_{270} = \frac{1}{4} |E_S|^2 + \frac{1}{4} |E_L|^2 + \frac{1}{2} |E_S| |E_L| \cos\left[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S - \frac{3}{2}\pi\right], \quad (6)$$

则在平衡探测器 1 和平衡探测器 2 上分别得到的差频信号为<sup>[15]</sup>

$$I_i(t) = I_0 - I_{180} = |E_S| |E_L| \cos[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S], \quad (7)$$

$$I_q(t) = I_{90} - I_{270} = |E_S| |E_L| \sin[(\omega_S - \omega_L)t + \varphi_S], \quad (8)$$

信号  $I_i(t)$  和  $I_q(t)$  之间的相位相差  $90^\circ$ ，分别称为正交分量  $I$  和垂直分量  $Q$ 。由(7)式和(8)式可推导出被测样品的相位，即

$$\varphi_S = \arctan \frac{I_q(t)}{I_i(t)}. \quad (9)$$

(7)式和(8)式中的差频信号  $I$  分量和  $Q$  分量，包含待测样品的相位信息，利用平衡探测器得到 4 束光光电流的差频信号，并进行三角变换，最终可得到待测样品的相位信息。

## 2.2 光纤四通道双平衡外差相位检测实验

为了验证所提出的基于光纤四通道双平衡外差相位检测的原理，进行了如图 1 所示的实验。实验中使用的激光光源是中心波长为 1550 nm 的光纤耦合输出的单模光纤激光器，电光调制器的调制频率范围为  $0 \sim 100$  MHz，平衡光电探测器的射频输出带宽为 4 MHz，此探测器(PDB450C)能在  $800 \sim 1700$  nm 的波长范围内有效地接收到光信号。

采用电光调制的方法对调制频率进行相应的控制。在实验中，选择了一个标准的  $1/4$  波片作为测试样本，对此波片所提供的相位进行测量。由(3)~(9)式可知，实际要得到样品的相位值为示波器显示的相位减去桥接器本身产生的  $90^\circ$  的相位。当调制频率设定为 500.5 kHz 时，采用分束比为 40:60 的光纤分束器开展实验，采集 40 次数据，并将数据分为 2 组。如图 2 所示，在 500.5 kHz 的调制频率下，此次数据采集的均方根(RMS)为  $89.1^\circ$ ，标准差为  $0.3^\circ$ 。通过上述 2 组测量数据，基本验证了搭建的光纤四通道双平衡外差相位检测实验光路是有效可行的，为后续的实验分析提供了基础。

## 3 分析与讨论

### 3.1 调制频率对相位检测的影响

光学信号的调制与解调是光学外差探测中的关键。对于调制频率过高的调制信号，光电探测器中的载流子寿命有限，致使载流子浓度瞬时值跟不上调制幅度的快速变化，高频响应率逐渐下降。在 2 MHz 频率内，红外探测器的响应率是不变的<sup>[16]</sup>。但是，光电探测器的  $1/f$  ( $f$  为频率) 噪声主要出现

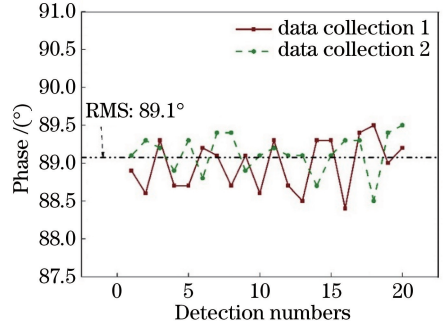


图 2 500.5 kHz 下的检测相位值

Fig. 2 Phase detection values at 500.5 kHz

在 1 kHz 以下的低频区，对于低频调制，将会给实际测量结果带来一定的噪声。因此，在实验中分析不同调制频率对信号的测量效果，对光学信号调制频率的实际设计有较高的参考价值。

改变调制频率，进行多次测量，结果如图 3 所示。图 3(a)和图 3(c)表明，当调制频率为 900.5 Hz 和 2.05 MHz 时，信号波形存在明显的噪声波动，此时的测量信号无法准确检测出符合要求的相位。图 3(b)表示，当调制频率为 100.5 kHz 时，信号检测波形明显，能够检测到相位信息。

在每一个调制频率下，对波片样品进行相位测量，在光纤分束比为 40:60 下进行实验，每组进行 20 次测量，取均方根值，最终得到不同调制频率下的数据如图 4 所示。结果表明，在本实验参数条件下，利用 500.5~1550.5 kHz 的调制频率可以获取较为稳定的测量信号。表 1 为不同调制频率下对应相位的标准差，说明在此调制频率范围内能够较好地获取所测相位值。

表 1 不同调制频率下的相位检测精度

Table 1 Phase detection accuracy at different frequencies

Frequency /kHz	RMS /( $^\circ$ )	Standard deviation /( $^\circ$ )
40.5	88.9	0.5
100.5	89.0	0.5
500.5	89.1	0.3
700.5	89.1	0.3
1550.5	89.1	0.3

### 3.2 光纤分束比对相位检测的影响

在实验条件下，经过光纤分束器的两束光的振

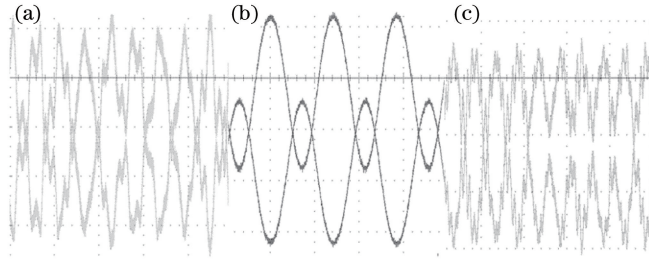


图 3 不同调制频率下的差频信号图。(a) 900.5 Hz; (b) 100.5 kHz; (c) 2.05 MHz

Fig. 3 Difference frequency signal diagrams at different frequencies. (a) 900.5 Hz; (b) 100.5 KHz; (c) 2.05 MHz

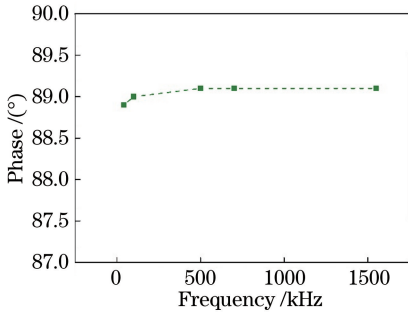


图 4 不同调制频率下的相位值

Fig. 4 Phase values at different modulation frequencies

幅存在差异,即  $E_S \neq E_L$ ,由此可以引起干涉条纹对比度的变化,进而影响到测量信号的精确度。通常,条纹对比度与两束光的振幅的关系为<sup>[17-18]</sup>

$$V = \frac{2E_S E_L}{E_S^2 + E_L^2} \cos \theta = \frac{2\sqrt{K}}{1+K} \cos \theta, \quad (10)$$

式中: $V$  为条纹对比度; $K = E_S/E_L$  是两束光束的振幅比; $\theta$  为光束干涉角。所以,不同的光纤分束比会导致差频信号  $I$  分量和  $Q$  分量相应的幅值发生变化,从而引起探测器表面接收光电流强度的变化<sup>[19]</sup>。由(10)式可知,当分束比接近 1:1 时,条纹对比度最大,获取的调制信号最强。

如图 5 所示,在同一调制频率下,采用不同的光纤分束比,对上述波片样品进行相位测量。受限于

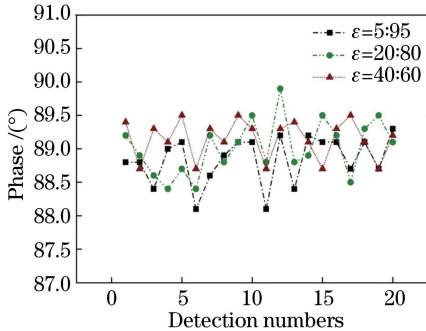


图 5 700.5 kHz 和不同分束比下的相位值

Fig. 5 Phase values at different fiber splitting ratios and 700.5 kHz

实验条件,无法满足分束比为 1:1 的情况。在本实验中实际分析了光纤分束比( $\epsilon$ )分别为 5:95、20:80、40:60 的情况,由表 2 中的标准差作为参照。如图 6 所示,在同一调制频率下,用不同的分束比进行检测,并对得到的标准差数据进行拟合。当光纤分束比接近 1:1 时,检测精度优于其他分束比下的检测精度。因此,在实际设计中,采用相等的分束比有利于测量信号的精确获取。

表 2 700.5 kHz 和不同分束比下的相位检测精度

Table 2 Phase detection accuracy at different fiber splitting ratios and 700.5 kHz

Splitting ratio	RMS / (°)	Standard deviation
5:95	88.8	0.4
20:80	89.0	0.4
40:60	89.1	0.3

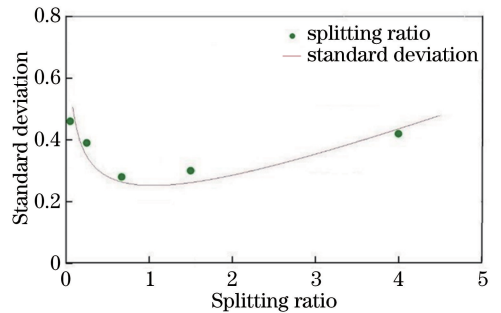


图 6 700.5 kHz 下分束比与标准差趋势图

Fig. 6 Trend graph of different fiber splitting ratios and standard deviations at 700.5 kHz

### 3.3 外差检测接收口径效应

在光学外差接收中,光束与探测器之间的接收口径效应是影响最终测量效果的关键因素之一。因此,对于空间传输的光学外差探测,有效接收口径是重点分析对象。在自由空间传输中等效接收口径效应<sup>[20-21]</sup>表示为

$$A_R \Omega_R \approx \lambda^2, \quad (11)$$

式中: $A_R$  为探测器接收表面; $\Omega_R$  为接收立体角; $\lambda$  为激光波长。

尽管实验中对光纤作了集成处理,但光经过电

光调制器件和测量样品时,仍然有一小部分在自由空间中传播。这种情况相当于有效接收口径由探测器部分前移至光纤耦合透镜部分,其理论模型仍可参照(11)式的自由空间传输模式。因此,在本实验方案中,对光束耦合透镜的接收灵敏度进行测试分析尤为重要。实验中通过对光纤耦合器的发射或者接收方向进行微调,验证了该系统的有效接收口径。如图7所示,接收角以对称轴为中心左右旋转,随着旋转角度的增大,接收信号的强度逐步降低,当超过 $1.2^\circ$ 时,将探测不到信号。为了得到较好的信号检测效果,尽量控制接收角度在 $-0.3^\circ \sim 0.3^\circ$ 范围之内。

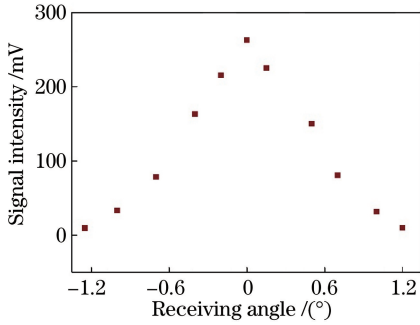


图7 信号强度与接收角度的关系图

Fig. 7 Signal intensity as a function of receiving angle

## 4 结 论

采用光纤集成式实现了四通道双平衡外差相位检测。通过改变电光调制频率的方法对光纤四通道双平衡外差探测性能进行了实验分析。结果表明:调制频率在1 kHz以下和2 MHz以上时,存在明显的噪声干扰,无法进行有效的测量;在最优的500.5~1550.5 kHz频率范围内,能够检测到待测样品的相位值,检测到的相位值为 $89.1^\circ$ ,标准差为 $0.3^\circ$ 。同时分析了双平衡外差干涉中光纤分束比以及耦合透镜的等效接收口径效应对相位检测的影响。对比结果表明:当光纤分束比接近1:1时,得到了较高信噪比的检测结果;光纤耦合透镜的有效接收口径会对接收信号的灵敏度产生实际影响。光纤四通道双平衡外差相位检测有效减小了空间传输过程中周围环境扰动产生的影响,提高了外差检测系统的稳定性和可靠性。

## 参 考 文 献

[1] Leirset E, Engan H E, Aksnes A. Heterodyne interferometer for absolute amplitude vibration measurements with femtometer sensitivity [J].

Optics Express, 2013, 21(17): 19900-19921.

[2] Gao L, Wang C H, Li Y C, *et al.* Fiber-coupled near-infrared laser heterodyne interferometer with fast optical scanning [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(12): 2499-2504.

[3] Luo Y, Feng G Y, Liu J, *et al.* Vehicle identification technology of laser heterodyne spectral analysis of vibration characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1108001.  
罗韵, 冯国英, 刘建, 等. 激光外差振动谱提取分析的车辆标识技术[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108001.

[4] Wu C M, Jian Z C, Joe S F, *et al.* High-sensitivity sensor based on surface plasmon resonance and heterodyne interferometry[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2003, 92(1/2): 133-136.

[5] Yu X L, Zhao L Q, Jiang H, *et al.* Immunosensor based on optical heterodyne phase detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2001, 76(1/2/3): 199-202.

[6] Wang S F, Chiu M H, Lai C W, *et al.* High-sensitivity small-angle sensor based on surface plasmon resonance technology and heterodyne interferometry[J]. Applied Optics, 2006, 45(26): 6702-6707.

[7] Wang B, Jing Z G, Peng W, *et al.* Phase difference signal processing technology in surface plasmon resonance sensing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0608009.  
王斌, 荆振国, 彭伟, 等. 相位表面等离子体共振传感系统中的相差信号处理技术[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0608009.

[8] Wu C M, Lawall J, Deslattes R D. Heterodyne interferometer with subatomic periodic nonlinearity [J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4089-4094.

[9] Hu H J, Zhang C J. Theoretical analysis for relations between nonlinearity errors and PBS in heterodyne interferometer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 241/242/243/244: 474-477.

[10] Gao S, Yin C Y. High measurement speed dual frequency laser interferometer [J]. Optical Technique, 2001, 27(3): 238-239, 246.  
高赛, 殷纯永. 高测速双频激光干涉仪[J]. 光学技术, 2001, 27(3): 238-239, 246.

[11] Zhang W J, Sun Y Q. Phase characteristics of the collinear heterodyne interferometer system [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 0414003.  
张文静, 孙运强. 共线外差干涉系统相位特性[J]. 光子学报, 2016, 45(4): 0414003.

[12] Snyder J J. Wide dynamic range optical power measurement using coherent heterodyne radiometry

- [ ] . Applied Optics, 1988, 27(21): 4465-4469.
- [13] Migdall A L, Roop B, Zheng Y C, *et al.* Use of heterodyne detection to measure optical transmittance over a wide range [J]. Applied Optics, 1990, 29 (34): 5136-5144.
- [14] Miao J, Zhang X J, Li Z, *et al.* Transmittance and phase measurement via self-calibrated balanced heterodyne detection [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 061201.
- [15] Pang Y J, Gao L, Wang C H. Analysis of IQ demodulation and signal noise ratio for 2  $\mu\text{m}$  dual-balanced heterodyne detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 0114001.  
庞亚军, 高龙, 王春晖. 2  $\mu\text{m}$  双平衡式外差探测 IQ 解调与信噪比研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0114001.
- [16] Zhang Y N, Wang Y, He X R, *et al.* High-frequency test of infrared detector [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(2): 19-22.  
张亚妮, 汪洋, 贺香荣, 等. 红外探测器的高频测试 [J]. 光学与光电技术, 2014, 12(2): 19-22.
- [17] Luo H Y, Ye Q H, Xiong W, *et al.* Study on the interferogram modulation efficiency of spatial heterodyne spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712003.  
罗海燕, 叶擎昊, 熊伟, 等. 空间外差光谱仪干涉条纹调制度影响分析 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0712003.
- [18] Han J, Bayanheshig, Li W H, *et al.* Profile evolution of grating masks according to exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (3): 0305001.  
韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0305001.
- [19] Wang C H, Gao L, Pang Y J, *et al.* Experimental investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of 2  $\mu\text{m}$  balanced coherent system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31 (11): 1104002.  
王春晖, 高龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 2  $\mu\text{m}$  平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1104002.
- [20] Siegman A E. The antenna properties of optical heterodyne receivers [J]. Applied Optics, 1966, 5 (10): 1588-1594.
- [21] Rider A D, Blakemore C P, Gratta G, *et al.* Single-beam dielectric-microsphere trapping with optical heterodyne detection [J]. Physical Review A, 2018, 97(1): 013842.