

# 基于光纤多波长激光器的相位延迟 高精度测量系统设计

马文斌<sup>1</sup>, 张海庆<sup>2</sup>

(1. 贵州民族大学 机械电子工程学院, 贵阳 550025;

2. 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 针对当前相位延迟测量系统, 缺少对入射光源的分析, 导致不同波长光源对应平移量误差大, 造成相位延迟测量精度低的问题, 设计了基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统; 通过分析光纤散射原因, 选取 532 nm 半导体激光作为系统光源, 采用伺服电机为系统供电, 使用 SGX5528 光电探测器实现光转换为电, 从而获得不同位置间的电位差; 利用聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振片, 使入射的纵光或横光具有起偏特性, 并测量偏振片的透振方向和横轴夹角, 完成系统硬件设计; 设置两束激光光源, 调整偏振棱镜, 使光强输出达到最大值, 并利用直接测量法, 计算待测波片的相位延迟, 通过调整光电调制器晶轴方位, 保证光束垂直入射到器件表面, 完成系统软件设计, 实现相位延迟高精度测量; 实验结果表明, 该系统在  $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  位置下的平移量误差分别为 0.008 mm、0.007 1 mm、0.002 mm, 均小于理想允许误差, 能够有效提高相位延迟测量精度。

**关键词:** 光纤多波长激光器; 相位延迟; 高精度测量; 测量系统

## Design of High Precision Phase Delay Measurement System Based on Fiber Multiwavelength Laser

MA Wenbin<sup>1</sup>, ZHANG Haiqing<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronics Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

2. School of Opto-electronical Engineering, Xi'an technological university, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Due to the lack of analysis of the incident light source in the current phase delay measurement system, the corresponding translation error of different wavelength light sources is large, resulting in low phase delay measurement accuracy. A high-precision phase delay measurement system based on fiber multi-wavelength laser is designed. By analyzing the cause of fiber scattering, 532 nm semiconductor laser is selected as the system light source, servo motor is used to supply power for the system, and SGX5528 photodetector is used to realize the conversion of light into electricity, so as to obtain the potential difference between different positions. The polarizer is made of polyvinyl alcohol (PVA) film to make the incident longitudinal light or transverse light have polarization characteristics. The transmission direction and transverse axis angle of the polarizer are measured to complete the hardware design of the system. Set two laser light sources, adjust the polarizing prism to make the light intensity output reach the maximum value, and use the direct measurement method to calculate the phase delay of the wave plate to be measured. By adjusting the crystal axis orientation of the electro-optic modulator, ensure that the beam is perpendicular to the surface of the device, complete the system software design, and realize the high-precision measurement of the phase de-

收稿日期: 2021-06-02; 修回日期: 2021-07-23。

作者简介: 马文斌(1997-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要从事光学图像高精度测量方向的研究。

引用格式: 马文斌, 张海庆. 基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1):

92-97.

lay. The experimental results show that the translation errors of the system at  $L_0$ ,  $L_1$  and  $L_2$  position are 0.008 mm, 0.007 1 mm and 0.002 mm respectively, which are less than the ideal allowable error, and can effectively improve the phase delay measurement accuracy.

**Keywords:** fiber multi-wavelength laser; phase delay; high precision measurement; measurement system

## 0 引言

激光器波片属于典型偏振光学元件之一, 可以对特定波长的光波产生一定的相位延迟, 被广泛地应用在许多与偏振有关的光学系统中<sup>[1-2]</sup>。相位延迟是激光器波片最重要的参数指标, 而波片的加工精度和测量精度直接影响着波片应用系统的质量。对激光器波片相位延迟的影响因素很多, 如受环境温度、受薄板厚度影响的加工均匀性和应力双折射等。其中, 参量大小对激光器可靠性能的影响很大, 应用系统质量也有很大影响。利用晶体双折射特性的激光波片作为相位延迟器件, 通过偏振器在特定波长上对光进行有效的偏振调节<sup>[3-4]</sup>。

相关领域研究学者对相位延迟测量进行了研究, 并取得了一定的研究成果。文献 [5] 设计基于弹光调制与数字锁相技术的波片测量系统。利用弹光调制器调制检测激光, 采用基于 FPGA 的数字锁相技术, 对调制信号进行提取, 解调波片相位延迟量和快轴方位角, 实现波片测量。该方法能够有效优化重复度, 但相位延迟测量精度较低。文献 [6] 提出基于双弹光差频调制的中红外相位延迟精确测量方法, 采用硒化锌型弹光调制器的差频降低系统, 对频率进行调制, 生成相位延迟低频调制信号, 根据调制后差频幅值, 计算波片相位延迟, 实现相位延迟测量。该方法能够有效抑制光强波动, 但偏振器的方位角容易对激光强度造成很大影响。为此, 设计了基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统。

## 1 系统总体架构设计

以光纤激光为光源, 将偏振波片置于光纤激光外腔中, 可使两个正相交的谐波产生相位差, 实现对相位延迟的测量。通过多波长光纤激光器中, 放置能在两个方向折射光的波片, 可将起偏器分裂成两个不同物理长度的起偏器腔, 每个腔内都会产生偏振频率, 由此测量相位延迟。系统总体架构如图 1 所示。

根据图 1 所示, 光纤多波长激光光路被垂直对

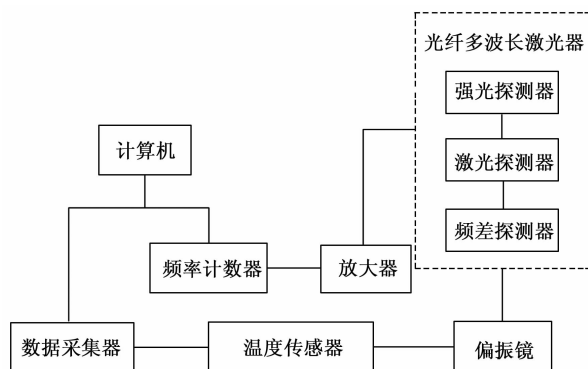


图 1 系统总体架构

齐, 由上而下分为强光探测器、激光探测器、频差探测器和计算机自动控制的测量程序<sup>[7-9]</sup>。采用工作波长为 632.8 nm 的半腔光纤多波长激光器, 谐振腔由一只或两只镜片组成, 反射面安装在压电陶瓷表面, 以激光器轴方向对腔长进行调节; 在光纤激光室开口安装波片支架, 将待测波片与偏置波片分开放置; 将温度传感器安装在晶片框架附近, 实时记录温度, 用于检测和补偿环境温度对晶片测量的影响; 利用数据采集器实时记录测量过程中光强变化曲线, 快速确定频差测量工作点; 频率计数器就是两种正交偏振型的频差检测器, 可以对工作点进行多次测量<sup>[10]</sup>。利用微机程序接收光强和频差信号, 通过改变压电陶瓷的驱动电压、控制光纤多波长激光腔长度等方法, 能够自动测量波片, 并根据波片不同的相位延时进行计算, 得到最终的测量结果。

## 2 系统硬件结构设计

基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统硬件结构主要由光源器件、伺服电机、光电探测器和人造偏振片组成。其中, 光源器件采用 532 nm 半导体激光器, 伺服电机将转子作为驱动装置, 利用永磁体特性驱动 U/V/W 三相电磁场, 并使用 SGX5528 光电探测器, 选取聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振薄膜, 完成系统硬件结构设计。在多波长光纤激光器进入该系统后, 当入射光功率超过一定阈值

时, 被介质吸收, 使介质密度呈现周期性变化, 从而形成光栅折射率。基于光纤散射现象的多波长激光器相位延迟高精度测量系统硬件结构如图 2 所示。

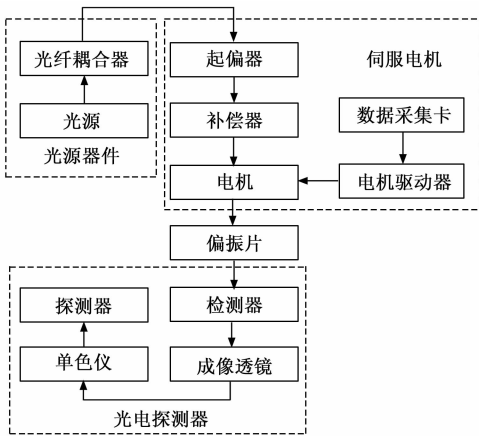


图 2 系统硬件结构

在图 2 所示的精密测量系统中, 采用光纤耦合器转角的大小, 利用光电探测器采集监测信息并传输到计算机中<sup>[11-12]</sup>。基于多波长激光源, 运用半导体激光器, 测量监测信息, 以提高数据测量的可靠性。利用光纤起偏器, 改善偏振态消光比, 结合补偿器, 调整激光偏振状态, 能够对光学器件产生的小相移进行补偿。通过数据采集卡, 结合电机驱动器, 控制伺服电机。将偏振片加入检测器中, 可根据偏光片的偏振角来计算待测样品的相位延迟时间, 即待测偏光片的偏振角。利用成像透镜, 分析偏振性能, 使用光电探测器, 将光能转化为电能, 实现电势差的检测。采用单色仪分析光谱并对光谱特性进行测量, 再应用探测器, 记录光谱线的位置和强度, 实现相位延迟的高精密测量。

### 2.1 光源器件

根据系统的多波长波片结构的特点, 在设计和测试初期就采用了多波长激光源, 而不需要进行强度测试。因此, 采用 532 nm 半导体激光器, 它具有高功率、高质量、低噪声、多波长等优点, 能有效提高数据测量的可靠性。该激光器的激光参数的稳定性和一致性较好, 不受功率、批量和工作温度的影响。

### 2.2 伺服电机

伺服电机的精度决定于编码器精度, 其结构如图 3 所示。

由图 3 可知, 脉冲器是伺服电机的定位功能, 每

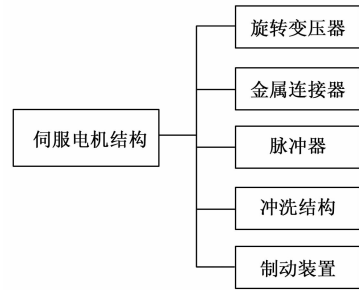


图 3 伺服电机结构

次收到脉冲器时, 就转动脉冲器相应的角度来实现位移。脉冲与伺服马达经反复一次旋转角度后, 形成回波或闭环, 系统根据脉冲进行发送或收回<sup>[13-14]</sup>。伺服电机采用转子为驱动装置, 利用其永磁体的特性来驱动 U/V/W 三相电磁场, 使电机的转动能够被非常精确地控制, 从而实现电机的精确定位。

### 2.3 光电探测器

使用 SGX5528 光电探测器, 该检测器是通过半导体材料将光能转化为电能, 以此检测电势差。SGX5528 光电探测器结构如图 4 所示。

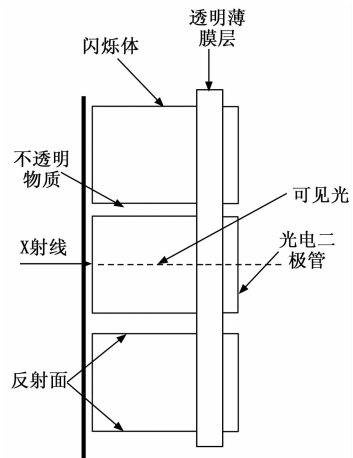


图 4 SGX5528 光电探测器

由图 4 可知, 光电导电效应是电子吸收光子能量, 由键态变为自由态, 因而在光的作用下, 会产生电导率的变化<sup>[15]</sup>。这种物理现象是由光辐射材料的电导率的变化所引起的, 在强光辐射下, 通过光子光学材料, 使光导体的电导率增大, 吸收后再产生光生载流子, 从而改变半导体的电导率。

### 2.4 聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振片

聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振薄膜结合力强, 不脱色, 耐潮湿, 能满足极化、选择性成膜的要求, 极

化薄膜可通过纵光或横光屏蔽和穿透入射光。聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振片的合成材料有黑白和彩色两种, 并能进行透射、反透射和反射。在网状聚乙烯醇薄膜中浸入碘盐溶液, 再用硼酸溶液还原稳定。聚合物经过 4~5 次重组后, 排列有序, 由网状结构转变为线状结构, 使碘分子在膜表面得到均匀吸附, 从而实现极化检测。

### 3 系统软件部分设计

#### 3.1 高精度测量设计步骤

基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统的测量步骤如下所示:

步骤一: 保证每个器件在底座上的稳定性, 调节光路以满足外形、同轴要求。通过前后限幅约 0.6 mm 的光孔, 光束进入光电探测器中, 避免系统的束流过大。

步骤二: 激光发射光分成两束输出, 其中一束是通过偏光片、电光调制器、相位补偿器、偏光片及光电探测器输出至显示装置, 另一束输出到激光单色仪, 用于测量光源的波长。

步骤三: 输出光强由偏振镜调整为最大或最小, 确保二者为正交。

步骤四: 调整电光调制器晶轴的方向, 将其放置在偏振镜和光镜之间, 使光通过信号线与电光调制器相连接, 保证光纤与光学表面的 90°角<sup>[16-18]</sup>。调节光电调制器的方向, 使激光光束旋转到消光位置, 保证偏振方向与激光光束平行, 并调整到倍频器可识别的 0°和 45°范围, 以保证测量结果的准确性。

步骤五: 在被测器件之间的光路中放置相位延迟为零的补偿器和电光调制器, 并对测波片的晶轴方位进行调整。通过被测仪的光学表面的光一定是垂直的, 通过被测仪的旋转, 光的传播方向就会传递到消光位置。随后将该装置旋转 45°, 示波器通过使该装置的长轴方向与补偿器的长轴方向一致来显示混合信号。当示波器倍频信号再次出现时, 可对补偿器的测量螺杆进行调节, 能够准确计算相位延迟, 从而实现对基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量。

#### 3.2 基于直接测量法计算相位延迟

以所测波片波长为基准, 测量同一光源的相位延

迟。首先用激光把光线分成两路, 一路通过分光镜到达单色仪, 然后由分光镜测量中心波长的精确值。另一路是要求偏光片具有与激光相同的偏振方向, 此时输出光强达到最大。

假设光纤多波长激光器的偏振方向为  $y$  轴方向, 激光在二维空间下的矩阵公式可表示为:

$$\hat{J}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

光纤多波长激光在经过起偏器  $p$  后, 其矩阵在二维空间下的矩阵公式可表示为:

$$\hat{J}_{xy} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

电光调制器的感应轴与  $x$  轴成 45°角, 速度与波片和补偿器  $C$  的速度轴一致, 可对电光调制器上施加三分之一的半波电压, 即 1 300 V, 可以满足线性测量的要求<sup>[19-20]</sup>。

加入交流调制信号, 由调制信号源加入光电调制器, 由此得到电压为:

$$V = V_m \sin 2\pi f_0 t \quad (3)$$

公式 (3) 中,  $V_m$  表示调制频率为 2 kHz,  $f_0$  表示交流信号频率,  $t$  表示调制时间。由此产生相位延迟为:

$$\varphi_E = \frac{\pi V_m}{V_a} \sin(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

公式 (4) 中,  $V_a$  表示电光调制器半波电压。

采用光纤多波长激光检测器<sup>[21]</sup>, 通过选择窄带放大器滤除无效信号和噪声, 得到较高的信噪比, 从而达到较好的检测效果。在信号处理电路中, 当检测到基带信号消失时, 只需要对倍频成分进行完全补偿, 源频率就会非常稳定, 从而可以有效地确定消光位置, 完成相位延迟高精度测量。

### 4 实验分析

为了验证设计的基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统的合理性, 进行实验验证分析。

#### 4.1 实际参数获取

在不加测波片的多波长激光器情况下, 调整相位补偿器到初始位置, 记录此位置为  $L_0$ ; 调整相位补偿器到  $2\pi$  时, 记录此位置为  $L_1$ ; 从示波器上光信号首次出现到光信号消失的记录位置为  $L_2$ 。针对不同波长光源位置下的平移量, 如表 1 所示。

表 1 不同波长光源对应的平移量

实验次数/次	$L_0$ /mm	$L_1$ /mm	$L_2$ /mm
20	2.751	15.035	12.315
40	2.750	15.033	12.315
60	2.754	15.031	12.317
80	2.748	15.032	12.315
100	2.740	15.036	12.316
120	2.735	15.039	12.314

从表 1 中可看出,理想情况下的测量系统平移量误差较小,其中  $L_0$  允许误差为 0.019 mm、 $L_1$  允许误差为 0.008 mm、 $L_2$  允许误差为 0.003 mm。

### 4.2 实验结果与分析

分别使用基于弹光调制与数字锁相技术的测量系统、基于双弹光差频调制的测量系统和基于光纤多波长激光器的测量系统测量不同波长光源对应的平移量,测量结果如图 5 所示。

由图 5 可知,使用基于弹光调制与数字锁相技术的测量系统  $L_0$  位置下的平移量最大值为 2.751 mm,最小值为 2.735 mm,误差为 0.019 mm;基于双弹光差频调制的测量系统  $L_0$  位置下的平移量最大值为 2.751 mm,最小值为 2.737 mm,误差为 0.014 mm;而基于光纤多波长激光器的测量系统  $L_0$  位置下的平移量最大值为 2.751 mm,最小值为 2.743 mm,误差为 0.008 mm。由此可知,三种系统误差均在理想误差范围内,但相比基于弹光调制与数字锁相技术的测量系统和基于双弹光差频调制的测量系统,基于光纤多波长激光器的测量系统的平移量误差较小,说明该系统在  $L_0$  位置下的平移量测量精度较高。

使用基于弹光调制与数字锁相技术的测量系统  $L_1$  位置下的平移量最大值为 15.040 mm,最小值为 15.030 mm,误差为 0.010 mm;基于双弹光差频调制的测量系统  $L_1$  位置下的平移量最大值为 15.039 mm,最小值为 15.030 mm,误差为 0.009 mm;而基于光纤多波长激光器的测量系统  $L_1$  位置下的平移量最大值为 15.038 mm,最小值为 15.030 9 mm,误差为 0.007 1 mm。由此可知,基于光纤多波长激光器的测量系统误差小于  $L_1$  允许误差,说明基于光纤多波长激光器的测量系统在  $L_1$  位置下的平移量测量结果精准。

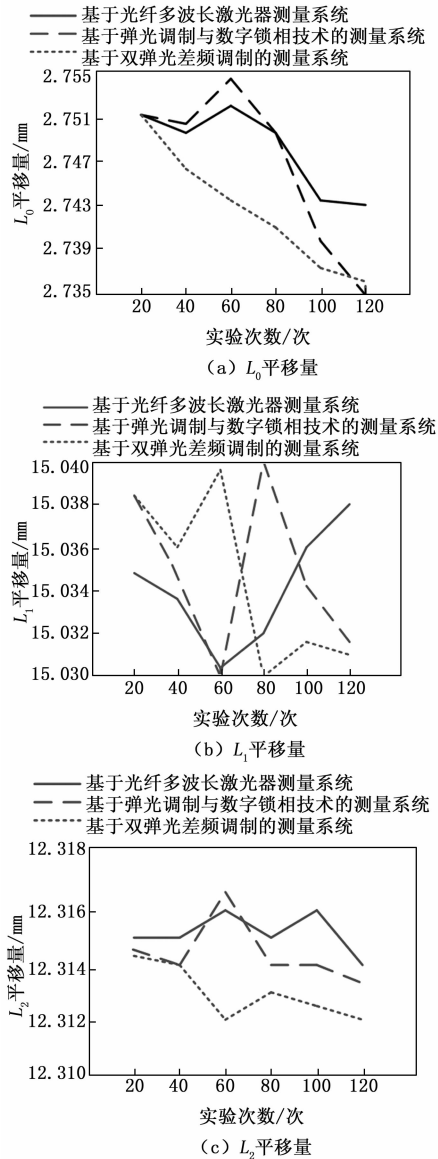


图 5 三种系统不同波长光源对应平移量测量结果

使用基于弹光调制与数字锁相技术的测量系统  $L_2$  位置下的平移量最大值为 12.316 8 mm,最小值为 12.313 5 mm,误差为 0.003 3 mm;基于双弹光差频调制的测量系统  $L_2$  位置下的平移量最大值为 12.314 5 mm,最小值为 12.312 0 mm,误差为 0.002 5 mm;基于光纤多波长激光器的测量系统  $L_2$  位置下的平移量最大值为 12.316 mm,最小值为 12.314 mm,误差为 0.002 mm。由此可知,基于光纤多波长激光器的测量系统误差小于  $L_2$  允许误差,说明基于光纤多波长激光器的测量系统在  $L_2$  位置下的平移量测量结果精准。

综上所述,基于光纤多波长激光器的测量系统在 $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 位置下的平移量测量误差较小,能够有效提高相位延迟测量精度。

## 5 结束语

为了减小不同波长光源对应平移量误差,提高相位延迟测量精度,设计了基于光纤多波长激光器的相位延迟高精度测量系统。通过选取532 nm 半导体激光作为系统光源,采用伺服电机为系统供电,使用SGX5528光电探测器实现光转换为电,利用聚乙烯醇薄膜拉伸型人造偏振片,测量偏振片的透振方向和横轴夹角。利用直接测量法,计算待测波片的相位延迟,通过调整电光调制器晶轴方位,保证光束垂直入射到器件表面,实现相位延迟高精度测量。该系统能够有效提高测量精度,减小测量误差。

### 参考文献:

[1] 贾文增,刘学胜,司汉英,等. 基于LCP径向偏振光输出的掺镱MOPA脉冲光纤激光器[J]. 光学精密工程, 2020, 28(5): 6-13.

[2] GAO Z, ZHANG W, YAN B, et al. A tunable single-longitudinal-mode wedge Nd:YVO4 laser with a YVO4 wave-plate[J]. Applied Physics B, 2020, 126(11): 172-176.

[3] 崔永俊,宋雪莹,刘坤,等. 基于FFT的高精度相位测量系统设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 114-118.

[4] 程晓芳. 基于传感器技术的可穿戴式设备信号频率测量[J]. 计算机自动测量与控制, 2019(7): 54-58.

[5] 王金伟,李克武,景宁,等. 波片相位延迟量测量和快轴标定系统[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 200-205.

[6] 张瑞,陈媛媛,景宁,等. 基于双弹光差频调制的中红外波片相位延迟高精度测量[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 184-190.

[7] 崔佳华,林百科,孟飞,等. 相位锁定至超窄线宽激光的高相干性双光梳研究[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(1): 25-31.

[8] 冯丽爽,高晶,焦洪臣,等. 谐振式光纤陀螺多激光器系统相对频率噪声抑制[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 1-8.

[9] TOMBERG T, N Vuorio, HIETA T, et al. Broadband laser-based infrared detector for gas chromatography[J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(21): 14582-14588.

[10] 杨振堃,金涛,韩梦莹,等. 一种滚转角和直线度同步干涉测量方法的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 26-35.

[11] 卢庆杰,刘薇,魏光宇,等. 基于光强实时反馈控制和同步校准的波长调谐移相干涉系统[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 878-884.

[12] KE L, LIU S, RUAN X, et al. Co-design of differential transimpedance amplifier and balanced photodetector for sub-pJ/bit silicon photonics receiver[J]. Optics Express, 2020, 28(9): 389-395.

[13] 张依宁,冯玉玲,王晓茜,等. 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 70-78.

[14] 吕贵洲,梁冠辉,朱赛. 雷达接收机脉冲灵敏度测试[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(9): 105-108.

[15] 傅圣友,王兆瑞,金声震,等. 基于相位条纹的高精度GPS码相位测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1824-1830.

[16] 钱广,李冠宇,牛斌,等. 高速InP基电光调制器和光电探测器[J]. 固体电子学研究与进展, 2019, 39(4): 83-83.

[17] 胡广尧,文天龙,张怀武. 硅基超材料太赫兹波电光调制器[J]. 压电与声光, 2020(3): 299-302.

[18] 赵显宇,曲兴华,陈嘉伟,等. 一种基于电光调制光频梳光谱干涉的绝对测距方法[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 90-102.

[19] 亓林,刘宇,邹新海,等. 一种基于UV-ESA自校准和高精度的PM电学测量方法[J]. 电子学报, 2020, 48(11): 206-210.

[20] 刘红博,史学舜,徐文斌,等. 基于低温辐射计的长波红外绝对光谱响应率测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(12): 34-39.

[21] FALCONI M C, LANEVE D, PORTOSI V, et al. Design of a Multi-Wavelength Fiber Laser Based on Tm:Er:Yb:Ho Co-Doped Germanate Glass[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2406-2413.