

基于 InGaAs/InP 单光子探测器的布里渊分布式传感测量方法*

鲍世娟 梁焱 段思邈 陈杰 曾和平

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 提出了一种基于 InGaAs/InP 单光子探测器的布里渊分布式传感测量方法,通过分析布里渊信号功率和频移的变化,可以对光纤的温度和应变特性同时进行准确识别和定位。此外,通过调整单光子探测器的探测周期,该测量方法可以满足近、中、远程光纤长度测量的需求。最终,实现了 25 km 光纤的布里渊光谱的测量,并清晰识别了在应力作用下的 0.05% 光纤形变。该方法提升布里渊分布式传感的灵敏度和测量范围,进一步拓宽了其在航空工业,地质工程等领域中的应用。

关键词: 布里渊散射;分布式传感;单光子探测;

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3020

Brillouin distributed sensing measurement method based on InGaAs/InP single photon detector

Bao Shijuan Liang Yan Duan Simiao Chen Jie Zeng Heping

(School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China)

Abstract: A Brillouin distributed sensing measurement method was demonstrated based on InGaAs/InP single photon detector (SPD). The temperature and strain characteristics of optical fiber could be achieved by analyzing the Brillouin power and spectral shift distribution. Besides, this method could measure different range optical fiber by adjusting the detection cycle of the SPD. At last, Brillouin spectrum of 25 km fiber was measured successfully and the 0.05% change of the fiber caused by strain was identified clearly. This method improved the sensitivity and the range of the Brillouin distributed sensing, further broadening its applications in the aviation industry, geological engineering and other fields.

Keywords: Brillouin scattering; distributed sensing; single photon detector

1 引言

在信息全球化的今天,现代通信技术在不断地飞速向前发展,随着光纤网络的快速发展和普及,当前全国各地区的网络的复杂性日益提高,光纤链路的物理网络的管理和维护性工作变得愈加繁重。更严重的是由于人为破坏、洪水、地壳运动、城建施工等造成的光纤故障也日益增加。因此,及时有效地预防和减少光纤网络隐患、障碍,减少线路问题造成的巨大损失,建立快速响应的光纤故障管理体系,就显得非常重要同时也成为诸多研究领域的热点。

布里渊光分布式传感技术作为一种最具有潜力的传感技术展现了其独特的优势。它不仅可以从功率变化上检测光纤网络上是否存在隐患、障碍,而且其在可以对温度和应

变同时进行传感的方向有独特的优势,还可以对桥梁,大坝,隧道,巨型建筑物等进行故障检测^[1-4]。因此,布里渊分布式传感(BOTDR)被广泛应用于大型的基础设施建设,航空工业,以及地质工程等领域中^[5-8]。但是,由于布里渊信号其功率比瑞丽散射功率低 2~3 级别,提高其探测效率成为当前的一大难题。而近年来随着单光子探测领域的发展,其探测效率在量子级别的探测器具有较大进展与突破^[9-13]。此时选用单光子探测器对微弱布里渊散射光信号进行探测,可大大提高分布式传感的测程与精度。

本系统的优点在于实现了一种基于近红外单光子探测器的布里渊分布式传感测量方法。本测量方法利用 InGaAs/InP 单光子探测器 (SPD) 作为探测核心,并通过 F-P(法布里-珀罗)扫描干涉法将后向散射信号进行频谱分

收稿日期:2016-11

* 基金项目:国家自然科学基金(11404212,11604209)资助项目

离。通过调节 InGaAs/InP 单光子探测器的测量周期,使其同时满足近、中、远程光纤长度测量的需求。除此之外,该系统还实现了人机交互功能,并可以因地制宜调整系统的各项参数改变测量的精度与范围,使整个分布式测量系统实现人工智能化、现代化,在当前的各大领域具有更加广阔的应用前景。

2 布里渊分布式传感系统方案

2.1 BOTDR 分布式测量系统框架

本文设计的是一种基于 InGaAs/InP 单光子探测器的布里渊分布式传感方法。该 BOTDR 分布式测量系统最少包括以下几个部分:系统核心控制模块、脉冲激光发射模块、法布里-帕罗(F-P)扫描干涉仪模块、InGaAs/InP 单光子探测器模块。其系统装置框架如图1所示。

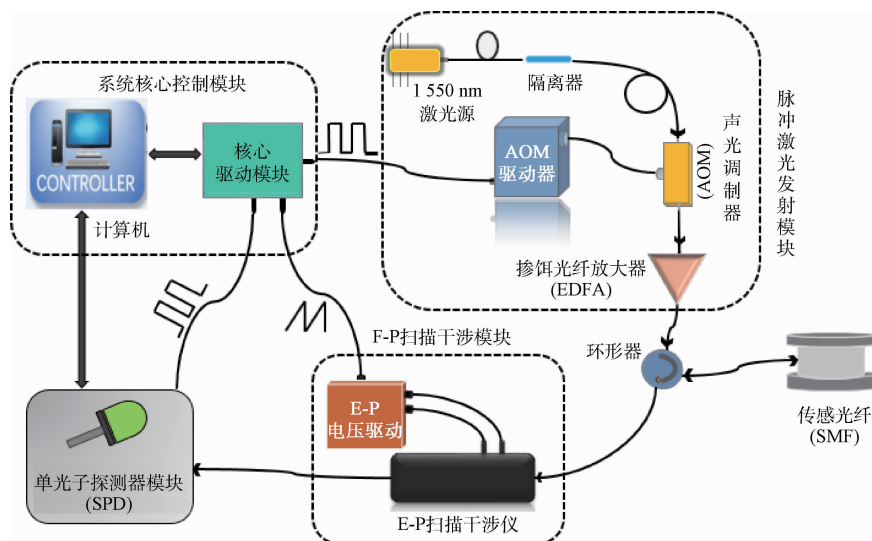


图1 系统装置框架

整个 BOTDR 分布式传感系统的工作过程如下:首先,1550 nm 半导体激光产生连续的 50 mW 激光,通过隔离器耦合进入 AOM 调制器中。由核心控制器件产生的脉冲调制信号控制 AOM 的驱动,当连续激光到达 AOM 后,它就立即被调制成脉冲宽带可调的激光信号,并送入 EDFA 进行放大,最终通过环形器耦合进入传感光纤。与此同时,核心驱动模块会产生两个与脉冲调制信号同频且同步的信号,其中一路为同频的锯齿波信号用作 F-P 扫描干涉仪的电压驱动信号;另外的一路脉冲信号作为单光子探测器的触发信号。当脉冲激光到达检测点后,后向散射光则从环形器的另一个端口入射进入 F-P 扫描干涉仪中。在一个锯齿波扫描的周期内,后向散射光的频谱发生分离。最后由 InGaAs/InP 单光子探测器模块对该分离的后向散射信号进行探测,并将输出的数据通过串口传送到电脑并进行存储。在这一周期性的测量完成后,通过调节脉冲调制信号与 SPD 触发信号的延时实现扫描式探测,完成光纤

的布里渊分布式测量。脉冲激光发射模块,包括激光光源、声光调制器(AOM)、掺铒光纤放大器(EDFA),用于激光脉冲的发射,作为 BOTDR 系统的入射光源。F-P 扫描干涉模块,包括 F-P 电压驱动和 F-P 扫描干涉仪两大部分,利用核心控制模块产生的锯齿波信号作为驱动,用于实现光纤后向散射光的频谱分离。系统核心控制模块,包括计算机和自主设计的核心驱动模块两部分,用于实现信号光脉冲、F-P 腔扫描干涉驱动信号与单光子探测器的触发信号同步执行功能控制;并完成人机交互功能,调整系统的各项参数,例如调制光脉冲的重复频率、调制脉宽、F-P 的扫描电压范围、扫描周期等,使整个系统实现人工智能化。SPD 利用 InGaAs/InP APD 作为光子探测器件,实现光纤后向散射光的探测,并将返回的光子信号转成电信号,并进行相关数据处理。

的布里渊分布式测量。

2.2 布里渊分布式传感系统的核心控制电信号

此布里渊分布式测量方法是将在 InGaAs/InP 单光子探测器与 F-P 扫描干涉仪相结合来实现分布式测量。BOTDR 系统中的核心控制电信号包括:光脉冲调制信号、F-P 腔扫描干涉电压驱动信号与单光子探测器的触发信号。其中,光脉冲调制信号,将现有的连续激光光源调制成脉冲光。此外,InGaAs/InP 单光子探测器通常工作在门控模式下以减小误计数,其门控信号需要一个原始的触发信号,称为 SPD 触发脉冲信号。最后,该分布式测量系统是利用 F-P 扫描干涉仪来进行频谱分离^[14-15],而 F-P 扫描干涉仪是电压控器件,在正常工作时需要一个驱动电压进行扫描,从而实现对人射光谱进行光谱分离功能。最终,根据 InGaAs/InP 单光子探测器的累计测量时间及系统分辨率,设置核心控制模块产生一个锯齿波信号作为 F-P 扫描干涉仪的电压驱动信号。为了实现对布里渊信号进

行精确的测量,脉冲调制信号、F-P 扫描干涉电压驱动信号和 SPD 触发脉冲信号,这 3 种信号需要同步执行。

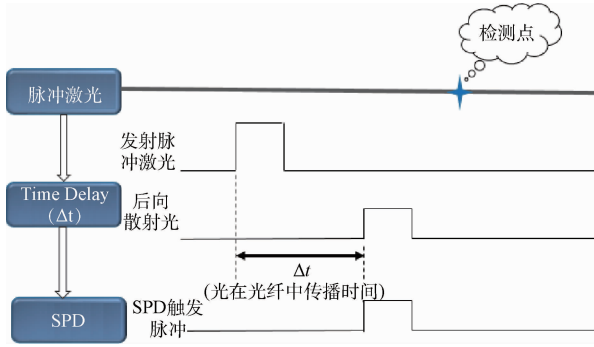


图 2 脉冲调制信号与 SPD 触发信号的时序

为确保在该方案中同步执行,设计了以现场可编程逻辑门阵列(FPGA)为核心的核心驱动模块。该模块利用同一时钟进行信号触发,确保输出的这 3 种信号同步同频。此外,在确保硬件准确无误执行的情况下,利用 Labview 工具设计了可视化的操作界面。通过该界面可以随时随地地进行人工操控,方便快捷的调节需要测量系统所需要的参数,包括 SPD 的探测周期、脉冲调制信号脉冲宽度、F-P 扫描周期、系统延时等。在 BOTDR 系统中,能检测的最远距离由脉冲激光的工作频率决定,频率越高,距离越短;通过调节激光频率即可调节测量范围,探测器的触发频率也会相应的改变,则保证了返回信号的探测的准确度及探测范围。

最后,通过扫描的方式实现全光纤的分布式探测,激光的脉冲调制信号与 SPD 触发信号的时序如图 2 所示。当脉冲激光到达传感光纤设定的位置点后,产生后向散射光返回到入射端;经过 F-P 扫描后,被 InGaAs/InP 单光子探测器探测。测试光纤中产生布里渊散射的位置 L : $L = 1/2 \nu_B \Delta t$; 其中, ν_B 为脉冲光在测试光纤中的光速, Δt 为脉冲激光从发射到测试点后再返回到入射端的时间间隔。由于 InGaAs/InP 单光子探测器工作在门控模式,只有 SPD 的触发信号到达其才能实现有效探测。由于激光脉冲与探测器同步触发,这两个触发信号间的延时与被测在光纤的飞行时间 Δt 相等,测量的位置信息可以直接从设定的脉冲调制信号与 SPD 触发信号间的延时 Δt 来得知。当 Δt 设定以后,单光子探测器测量的光信号只是在位置 L 处反射回来的后向散射信号。因此该系统是通过扫描的方式实现整个光纤的分布式传感。

3 测量结果

3.1 分布式传感结果

在此实验中,首先将一段长度约 230 m 短距离的标准通信光纤进行近距离的分布式测量。测量过程如下:首先,由 1 550 nm 激光器产生功率为 50 mW 的连续激光;利

用重复频率为 400 kHz,脉宽为 50 ns 的脉冲调制信号控制 AOM 驱动器,将连续的激光调制为重复频率为 400 kHz,脉宽为 50 ns 的脉冲激光。后向散射的光信号被 F-P 扫描干涉仪进行分离后,被单光子探测器探测并存储。核心控制模块通过调整脉冲控制信号与 SPD 触发信号之间的延时,实现全光纤的分布式测量。

实验中控制光纤的温度及应力,为了对比方便,将光纤分为 5 部分,每一部分对应的温度与应变状况如下: (0~30 m, 20 °C, 0 με), (30~80 m, 70 °C, 0 με), (80~130 m, 22 °C, 0 με), (130~180 m, 22 °C, 500 με), (180~230 m, 22 °C, 0 με)。在整条链路中包含 11 个测量点,各个点的间隔为 15 m。F-P 的 FSR 为 5.5 GHz,其计算布里渊频移 ν_B (GHz)的公式如下:

$$\nu_B = 5.5i + \Delta f = (i \pm \Delta t/T_0) \times 5.5 \quad (1)$$

式中: i 为整数, T_0 为 F-P 扫描干涉仪的扫描周期。

实际测量的布里渊频移结果如图 3 所示,单光子探测器测量的后向散射频谱三维图。在图 3 中存在 3 个十分清晰的计数峰,处于正中间的峰值最大,而其它两个峰的峰值相差无几,同时它们与中间峰值的频差也几乎相等。在实际的后向散射光中,瑞丽散射光的光谱分布在中间,两边的是布里渊散射的斯托克斯光和反斯托克斯光。同时该计数峰的立体图的光谱分布与运用光谱仪测量的后向散射光的频谱特征完全一致。由此可以推断出处于中间的是瑞丽散射光峰而两边的为布里渊斯托克斯和反斯托克斯频谱。历年的研究表明,1 550 nm 光纤的布里渊频移量大约为 11 GHz^[16-17]。图中的 15 m 处的测量值代入上述布里渊频移的计算公式得到两组结果 11.886 GHz 和 10.141 GHz,其与前人研究结果相一致。而且从图 3 中布里渊峰值可以看出:随着距离的增加,斯托克斯布里渊计数峰值的颜色从红色变成黄色,这表明布里渊信号的功率在不断降低。并且在图 3 中的在 150~180 m 的距离内出现了一个比较明显的峰值跌落,其布里渊的颜色数峰突然从橙色变为绿色,这表明布里渊散射的功率出现明显的减少。

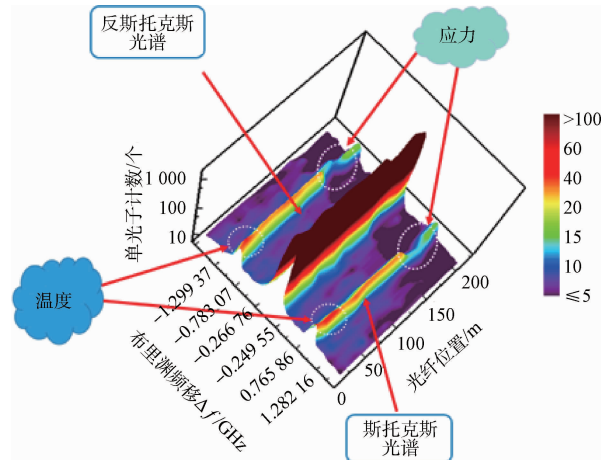


图 3 单光子探测器测量后向散射的三维图

与此同时,布里渊频移也出现了较为明显的移动。而产生这一变化的实际原因是该段上额外施加了约 $500 \mu\epsilon$ 应力。该段应力的变化导致光纤发生形变,该段的折射率发生了变化,图 3 里的变化的布里渊频移和光子计数则间接反映了该系统对应变测试能力。除此之外,在 $30 \sim 50 \text{ m}$ 处,光子计数值是明显的红色,而且其频移出现细微的增加。这是由于温度的变化也会影响布里渊峰值功率,同时产生一定的频移。所有的数据表明该 BOTDR 系统可实现分布式温度和应变同时传感。

3.2 应力实验

本文进一步对该 BOTDR 系统的应变传感灵敏度进行了详细地测试。由于系统所用采用的光纤长度约为 230 m ,调制的脉冲宽度为 50 ns ,故选用的单光子探测的触发脉冲重复频率依然为 400 kHz 。在该部分实验中,对传感光纤单独施加应力进行传感实验时,利用两个自制的圆盘作为两端,将传感光纤缠绕在两圆盘上。然后用力向相反方向拉动光纤圆盘,使得光纤在轴向方向上由于应变拉力的作用而拉伸。

在实验的过程中,由于传感光纤工作在自发布里渊散射的状态,在初始的状态下传感光纤是无应变的。对缠绕的光纤不断施加了拉力,此时传感光纤的后向散射光分布情况如图 4 所示。其中横坐标是布里渊相对瑞利散射光的频移,纵坐标表示单光子探测器的光子计数,其值代表了后向散射光的光功率的大小。在图中可以明显可看出施加应力段光纤的后向散射功率随着压力的增大而发生明显的降低。其中布里渊的频移量随着温度和应变变化的公式如下:

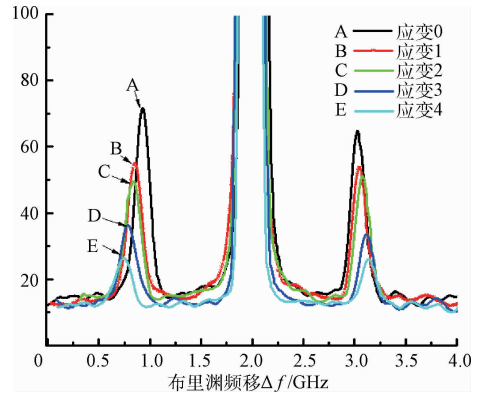


图 4 不同应变下 230 m 处的后向散射谱分布

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta P_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu T} & C_{\nu\epsilon} \\ C_{PT} & C_{P\epsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ΔT 是温度的变化量, $\Delta\epsilon$ 是应变的变化量, $C_{\nu T}$ 为布里渊频移随温度变化系数 ($1.10 \pm 0.02 \text{ MHz/K}$), $C_{\nu\epsilon}$ 为布里渊频移随应变变化系数 ($0.0483 \text{ MHz}/\mu\epsilon$), C_{PT} 温度对布里渊功率的影响系数 ($0.32\%/K$), $C_{P\epsilon}$ 为应变对布里渊功率的影响系数 ($-9.1 \times 10^{-4}\%/\mu\epsilon$)。在表 1 中为测得实际布里渊频移值与应变的变化值。表 1 显示,光纤中的后向散射光整体分布趋势与理论分析一致。自发布里渊散射光强度会随应变的增加而减小;同时产生的布里渊频移也会随之逐渐增加。从表中给系统可以明显分别出 5 MHz ,光纤每拉伸 1% ,发生的的频移约 100 MHz 。故而,该分布式测量方法可以识别 0.05% 的光纤形变。

表 1 不同应变下的实际放入布里渊频移表

光纤受 力情况	反斯托 克斯/GHz	斯托克 斯/GHz	频移改变量/MHz (反斯托克斯)	频移改变量/MHz (斯托克斯)	应变 量/ $\mu\epsilon$
无应变	11.135 4	11.075 17	0	0	0
应变 1	11.152 62	11.090 98	17.22	15.81	340
应变 2	11.169 83	11.115 4	17.21	24.42	431
应变 3	11.195 64	11.149 83	25.81	24.43	519
应变 4	11.214 25	11.192 85	18.61	23.02	432

3.3 近、中、远距离实验

此外,考虑到所用的 InGaAs/InP 单光子的探测效率,激光脉冲的重复频率最低为 4 kHz ,则对应该系统的可测得的最远距离为 25 km 。由于该 BOTDR 系统通过调节探测器的测量周期,可以对不同长度的传感光纤进行测量。在此,得到了不同的光纤长度的布里渊光谱。图 5 所示为不同光纤长度测量点下利用该 BOTDR 系统测量的后向散射光的信息分布。在实验中不同的距离下设置的 SPD 触发重复频率分别为 1 MHz 、 50 kHz 和 4 kHz ,其测量结果如图 5 所示。可以同时清楚观察到瑞利和布里渊后向散

射的计数峰。与此同时,随着测量距离的增加,瑞利和布里渊的峰值计数都在不断减少。例如,布里渊的斯托克斯峰在 9 m 处的峰值计数可以达到 40 以上,而当测量光纤的距离上升至 25 km 后,测量的峰值计数则只剩下不到 10 个计数点。除此之外,图 5(a) 中的瑞利峰远远高于在图 5(c),其数量的减少主要是由于两个因素:1) 反向散射信号的光功率在沿光纤传播时,会产生一定的衰减。2) 随着重复频率的降低,InGaAs/InP 单光子探测器在有效的时间内有效的计数会成比例减少。在测量距离超过 2 km 时,使用 EDFA 放大入射脉冲功率,以便确保足够的有效

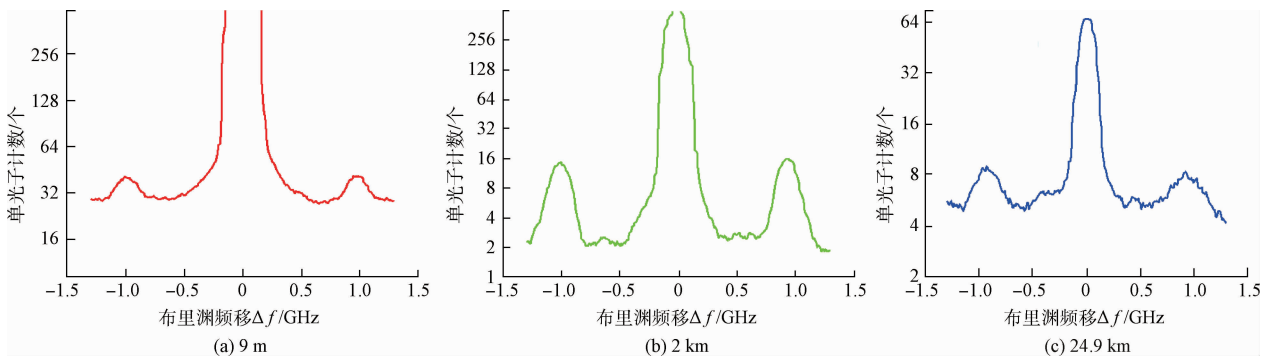


图 5 不同光纤长度测量点下的后向散射光的信息分布

的反向散射计数,从而实现长距离的探测。

4 结 论

本文通过各部分实验对该基于 InGaAs/InP 单光子探测器的布里渊分布式测量方法进行了相关的性能认证,通过分析布里渊的功率和频移变化分析,成功的实现了对光纤温度和应变的同时传感。同时,运用该方法完成了在应力作用下 0.05% 光纤形变的清晰识别,并利用重复频率为 4 kHz 的 1 550 nm 脉冲光完成了 25 km 的布里渊光谱的测量。该方法通过调节单光子探测的测量周期,可进行对近、中、远不同长度的传感光纤进行了布里渊频谱测量。

参考文献

- [1] 张畅生,郭旭敏,刘龙春,等. 高压直流海缆综合在线监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 27-33.
- [2] 王宝军,施斌. 边坡变形的分布式光纤监测试验研究及实践[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 28-34.
- [3] 李永倩,赵丽娟,杨志,等. 基于 BOTDR 的海缆 3D 立体监测系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1029-1036.
- [4] 王菀,干昆蓉,施斌,等. 一种基于布里渊光时域反射的土质隧道分布式光纤传感应用技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(2):110-115.
- [5] 张吉生. 外差检测式光纤布里渊温度和应变分布同时测量系统研究[D]. 保定:华北电力大学, 2008.
- [6] 童仁园,李青,李明. 基于时域反射的分布式地表变形探测技术[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11):2572-2578.
- [7] 吴飞龙,徐杰,郑小莉,等. 光纤传感技术在海底电缆监测中的研究及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016(3):72-76.
- [8] 张勇,魏广庆,施斌,等. 基于 BOTDR 的传感光纤温度效应研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10):929-934.

- [9] 李永富,刘俊良,王青圃,等. 基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的高速单光子探测器雪崩特性研究(英文)[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4):427-431.
- [10] 朱勇,欧阳俊. 单光子计数系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(Z1):28-30.
- [11] 高家利,汪科,盘红霞. 近红外 1550 nm 单光子探测器硬件电路设计[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 674-677.
- [12] 许黎霖. 基于 InGaAs/InP APD 的近红外单光子探测器的研究[D]. 上海:华东师范大学, 2009.
- [13] 王飞,赵远,张宇,等. 激光脉冲强度对于盖革模式单光子探测测距精度影响的理论研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10):2771-2775.
- [14] 薛峻文,方宇杰,谢海军,等. 基于 PA92 的 F-P 扫描干涉仪设计[J]. 光学技术, 2016(3):278-280.
- [15] 冯璐. 法布里-珀罗标准具和共焦球面扫描干涉仪的调节[J]. 大学物理实验, 2016, 29(3):18-20.
- [16] 王其富,乔学光,贾振安,等. 布里渊散射分布式光纤传感技术的研究进展[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(7):7-9.
- [17] 孙世林,周会娟,孟洲. 光纤布里渊分布式温度应变同时传感研究进展[J]. 半导体光电, 2013, 34(1):6-11.

作者简介

鲍世娟,上海理工大学,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信及传感。

E-mail:nayabao2016@126.com

梁焰,上海理工大学,讲师,主要研究方向为单光子探测及其应用。

段思邈,上海理工大学,硕士研究生,主要研究方向为大赫兹波谱成像。

陈杰,上海理工大学,讲师,主要研究方向为量子探测及其应用。

曾和平,上海理工大学,博士生导师,主要研究方向为单光子光学及其高新技术应用和超快精密分子光谱学。