

基于荧光光纤的临近空间飞行器局部放电故障的地面模拟实验研究

章昌凤¹, 谢飞扬¹, 黄小琦², 李茂¹, 严宇恒¹, 郭强^{1*}

¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;

²中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094

摘要 针对处于临近空间的飞行器高压供电系统发生的局部放电故障, 采用一种基于荧光光纤的全光纤传感系统进行地面模拟环境下的测试, 得到等效气压状态下临近空间的局部放电响应参数。该系统等效地面高度可达 20 km 以上, 可实现真空实验舱内直径为 86 cm 的空间范围内的局部放电故障检测。实验结果表明, 基于荧光光纤的全光纤传感系统对不同压强条件下的局部放电故障具有良好的光电响应特性。

关键词 光纤光学; 塑料荧光光纤传感器; 局部放电; 临近空间; 真空压强; 局部放电地面模拟系统

中图分类号 TM851

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1506003

Ground Simulation Experiment of Partial Discharge Fault in Near-Space Vehicle Using Fluorescent Fiber

Zhang Changfeng¹, Xie Feiyang¹, Huang Xiaoqi², Li Mao¹, Yan Yuheng¹, Guo Qiang¹

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract An all-optical fiber sensing system based on fluorescent fiber is proposed to detect partial discharge faults during ground simulation experiment for the high-voltage supply system in the cabin of a near-space vehicle. The partial discharge response parameters in the equivalent vacuum state of near space are obtained, and the equivalent ground height of the proposed system is more than 20 km. A partial discharge fault in the vacuum cabin of the flight vehicle with a diameter of 86 cm can be detected. Experimental results confirm that the proposed all-optical sensing system has suitable optical electron response and sensing characteristics for partial discharge faults at different pressures.

Key words fiber optics; plastic fluorescent fiber optic sensor; partial discharge; near space; vacuum pressure; local discharge ground simulation system

OCIS codes 060.2370; 350.5400; 260.7210; 300.6280; 120.4820

1 引言

局部放电(简称局放)是中高压供电系统最常见的一种绝缘缺陷。短期局放使绝缘材料腐蚀降解; 长期局放所产生的热量和碳化化学活性物质会改变

绝缘材料结构, 降低系统聚合物材料绝缘质量, 缩短系统使用寿命^[1-2]。局放故障是供电系统中的绝缘层存在的部分空隙、悬浮粒子、内部凸起元件及自由粒子导致电场分布不均匀造成的, 通常伴随着化学反应、电磁辐射、声波振动及发光等现象。目前对局

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-01-13; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(D20031)、“十三五”装备预先研究共用技术课题(41424050605)

通信作者: *qguo@shu.edu.cn

放故障的检测方法也是基于上述现象,检测方法主要分为化学分析法^[3]、电流检测法^[4]、超高频法^[5]、声波法^[6-7]及光强检测法^[8-9]。近年来光纤型的局放传感大多属于声波法和光强检测法,究其原因光纤传感器具有抗电磁干扰、远距离传输、耐腐蚀、高空间分辨率和易于布置在任意位置等特性^[10-11]。声、光两种检测方法都用光纤作为传感单元,将局放信息转换成光信号再由光纤实现远程传输。前者激励源是局放故障中产生的声波信号,而后者是局放故障中的伴生光脉冲。基于光纤的声波检测技术已实现局放定位检测,但不同放电类型产生的声波的不同频率分量的衰减不同,高频部分衰减大于低频^[12],定位误差较大。两种检测方法各具优势,但最大区别在于声波需要介质传输,这限制了声波检测技术在稀薄大气层甚至外太空的航空、航天领域的应用。临近空间是介于航空和航天领域之间的空间,高度在 20~100 km^[13]。相较于地面环境,临近空间高度内气压变化较为明显,飞行器舱内发生的局放故障将影响电气系统运行和控制安全。目前,国内外学者对该领域的研究还不多,对局放信号在气压变化条件下的诸多特性研究不够明确。

本文提出并设计了由荧光光纤作为传感单元和硅-光电倍增管(SiPM)作为探测器的全光纤荧光瞬态响应监测系统。利用真空实验舱模拟不同轨道高度的气压状态,对局放光信号进行测量。实验测得了局放信号的光电波动性、真空环境改变对局放信号的影响、局放信号在空间衰减的响应特性。

2 荧光光纤传感机理及临近空间局放地面模拟系统

利用局放故障产生的光脉冲作为激发光,使荧光光纤纤芯中的荧光分子团发光^[14]。实验中,局放故障模型为中国空间技术研究院局放故障标准校验源,即局放故障发生器。局放模型为铜材质的针-板电极,极间距为 0.2 mm。选用的传感光纤为长 5 cm、纤芯直径 1 mm 的塑料荧光光纤(BCF-12,法国圣戈班),并利用紫外光谱仪(QEPRO-KIT07,美国海洋光学)和荧光光谱分析系统(FLS980,爱丁堡)分别测试了局放模型的发射光谱和荧光光纤的激发、发射光谱,如图 1 所示。局放模型受到电极材料、类型、极间距及外加电压等因素影响,产生的放电光谱会有所不同^[15-17]。不同类型电极在不同的外加电压频率范围下,放电特征有所不同^[18]。采用针-板模型,其光脉冲主要集中在 210~400 nm,而

荧光光纤的激发、发射谱范围分别为 250~400 nm 和 370~600 nm。光谱信息表明局放光谱和光纤激发谱有重叠,因此传感器光谱和局放模型光谱相匹配,能够实现局放光脉冲的检测。

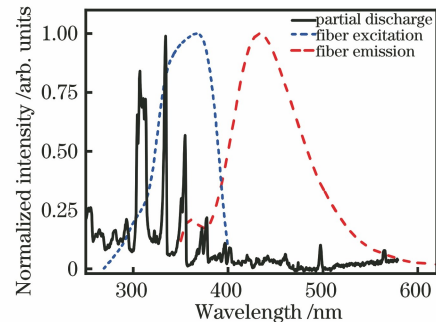


图 1 荧光光纤的光谱特征和局放光谱
Fig. 1 Fluorescent fiber spectra and partial discharge spectrum

为了在地面研究不同大气压强下的局放故障响应,建立了如图 2 所示的地面模拟实验系统。该系统包括不同真空压强环境参数设定的真空实验舱、局放故障发生器、荧光传感光纤、传输光纤、SiPM(C13366,滨松)及解调系统。在放电模型的一个电极接入电流互感器作校验参考。光、电信号接入数字示波器(DSO9064A, Keysight)进行分析处理。其中 SiPM 检测范围为 320~900 nm,光电转换灵敏度可达 1.3×10^9 V/W。为降低外界光噪声信号的干扰,对传感光纤进行避光封装,所有实验均在室温条件下进行。

3 实验结果与讨论

3.1 局放故障模型的电-光特性

由于针-板电极在高压下产生极不均匀的电场,在标准大气压中,局放模型的放电满足流注放电理论^[19]。其不稳定性主要源于外界环境中局部区域介质和电场间的分布及微观流注通道内部和介质分界面处电子分布的不均匀^[20-21]。因此流注通道内的电子碰撞路径不同,出现多个分支现象,且具有一定的随机性质。但总体上放电过程中的等离子体沿着电极方向前进^[22],同时空间内二次电子雪崩的形成具有一定的概率统计性规律。

局放的随机性质主要源于电子-分子碰撞过程中的电场强度、初始电子处于电场中的位置、介质表面充电力关系、电离离子空间随机分布、气体密度或成分的波动、初次放电残留的电荷等相关因素。van Brunt^[23]通过局放的气体电离系数 α 说明随机过程。

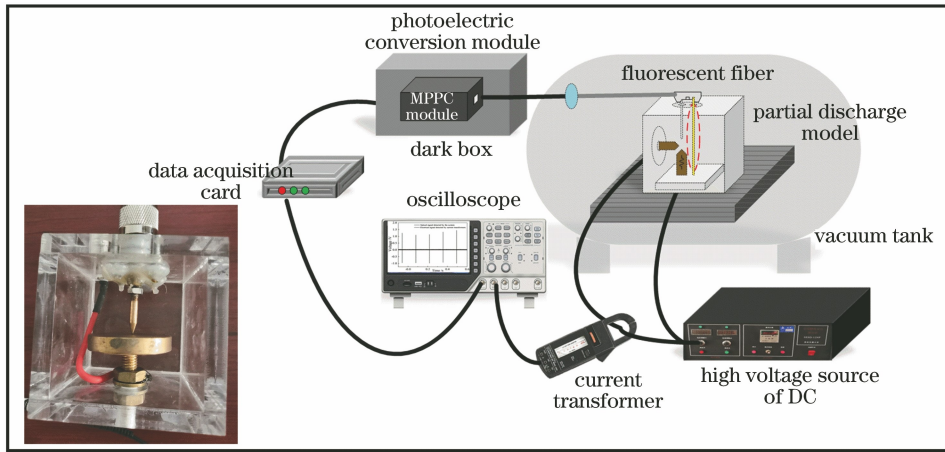


图 2 临近空间飞行器局放故障地面模拟检测系统

Fig. 2 Ground simulation detection system for partial discharge fault of near-space vehicle

$$\alpha\left(\frac{E}{N}\right)=\left(\frac{2}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} N \int_{\epsilon_t}^{\infty} \frac{F(\epsilon, E/N) \sigma(\epsilon) d\epsilon}{W(E/N)}, \quad (1)$$

式中： N 为电子个数；函数 $F(\epsilon, E/N)$ 表示与电场 E 有关的电子动能分布； $\sigma(\epsilon)$ 为取决于电子能量的电离截面，决定电子与分子碰撞产生电离的概率大小； m_e 为电子的质量； $W(E/N)$ 为电子漂移速度； ϵ_t 为 t 时电离阈值能大小。局放过程中碰撞电离的大小和给定电场与气体分子碰撞而引起电离的单位路径长度概率有关。从(1)式能够看出，局放是个复杂的随机过程，同时还具有对上次放电的记忆特征，因此具有内在随机概率特性。

为验证局放模型的放电强度随机特性，将荧光瞬态响应系统与电流互感器同时接入局放模型。实验中，放电模型极间电压保持 8 kV，放电脉冲间隔为 1 s，重复测试 20 次放电。数字示波器显示的电流互感器和光纤传感器数据如图 3 所示。作为对比的两套传感器测得的数据均说明局放模型放电的不稳定性。归一化后的电流脉冲与均值的最大偏差约为 0.5599 mA，偏移量约为 4.8%；而归一化后的光强信号最大偏差为 0.4643 V，偏移量约为 11%。测试结果显示，由于流注放电现象造成的分叉，在同样放电电压条件下，光强和电流仍有细微波动。

3.2 真空环境的局放模型响应

为了进一步研究不同轨道高度的临近空间局放故障特性，在真空实验舱内设定不同气压来模拟相应的轨道高度。实验中局放故障模型的工作电压为 6.4 kV，轨道高度与气压的关系可由玻尔兹曼经验公式得到^[24]

$$p = 10.1325 \times 10^4 \times (1 - 2.252 \times 10^{-5} h)^{5.264}, \quad (2)$$

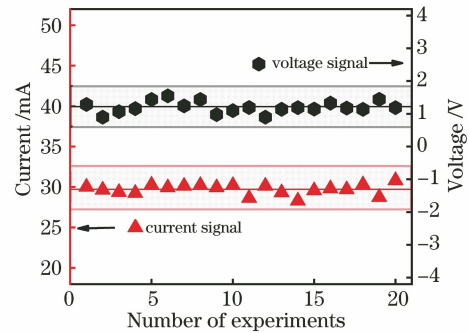


图 3 电流互感器和荧光系统检测局放模型的脉冲波动

Fig. 3 Pulse fluctuation of partial discharge model detected by current transformer and fluorescence system

式中： p 为气压； h 为高度。实验中的压强为 50 ~ 4 kPa，对应的轨道高度为 5.5 ~ 20.5 km。不同气压条件下的局放响应如图 4 所示，当气压从 50 kPa 减小到 4 kPa 时，SiPM 测得的光纤传感器响应的电压脉冲信号的饱和宽度增大，即局放强度随气压减小而增大。这是由于整个传感系统的传感效率高，传感传输的光子数大于像素数目，SiPM 出现饱和效应，但输出的电压脉冲形状变化仍包含入射信号强度变化信息^[25]。而当轨道降低，即气压增大时，局放所需的起始击穿电压增大^[26]，因此高压电气系统在高轨道上更易发生放电故障。根据巴申定律^[27]，击穿电压 (V_b)、气压及极间距 (d) 的函数关系为

$$V_b = f(pd). \quad (3)$$

实验过程中局放模型的极间距为常数，由此可得

$$V_b \propto p. \quad (4)$$

当外加电压 V_p 大于局放模型间介质的击穿电

压时,气体才发生放电现象,因此有

$$V_p = V_b + V_e = V_b + E, \quad (5)$$

式中: E 为电极间电压 V_e 形成的电场,实验过程中外加电压恒为 6.4 kV。将(5)式代入(4)式可得

$$V_p - E \propto p. \quad (6)$$

根据(6)式得到,当外加电压一定时,极间电场与气压成反比。空气中的放电主要是自由电子与氮气气体分子碰撞电离形成的。碰撞过程中满足能量守恒,忽略能量损失,则

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = W_e = nh\nu, \quad (7)$$

式中: $\frac{1}{2} m_e v^2$ 为电子碰撞前总动能; v 为电子碰撞前的速度; W_e 为碰撞后氮气气体分子的总激发能; h 为普朗克常数; ν 为光子频率; n 为碰撞后发射光子数; $h\nu$ 为单个光子能量。结合(6)、(7)式可得

$$W_e \propto V_p - p. \quad (8)$$

根据(8)式得到,外加电压一定时,气压越小,电子碰撞电离概率越大,总光子能量越强,此时发射紫外波段的光子数增加。这与地面模拟条件下的实验结果相一致。同时 Rui 等^[28]也得出了在低气压中航天器绕组局放现象更明显的结论。这证明了荧光光纤传感系统能有效地检测不同气压下的局放故障信号响应。

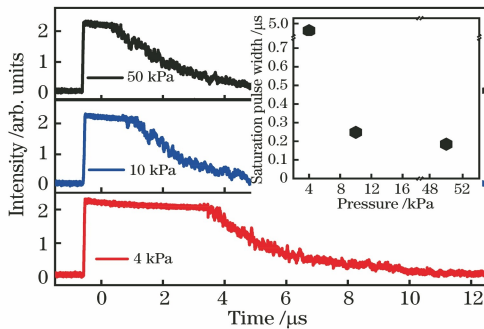


图 4 局放模型的脉冲响应与气压的变化关系

Fig. 4 Relationship between the pulse response of partial discharge model and the change of pressure

3.3 局放模型的信号衰减响应

为了更进一步确定临近空间飞行器仪器舱内局放故障点与传感器空间定点的分布关系,研究了局放故障点与传感器点对点的空间信号衰减响应。实验中压强为 101.3 kPa,电压为 8 kV。通过改变传感器和局放模型之间的距离(SSD)来进行测试。SSD的变化范围为 15~43 cm,每次 SSD 改变量为 2.5 cm,重复次数为 10。选用的商用 PMMA 传输光纤长度分别为 11 m 和 21 m,直径为 1 mm,数值

孔径为 0.5^[29]。由于 SiPM 对光子响应有电压饱和和现象,将 SSD 初始值分别设为 15 cm 和 20.5 cm,使得整个测试过程 SiPM 均为不饱和的幅值响应。测试结果如图 5 所示。在 15~43 cm 内荧光光纤传感器对局放信号的 SSD 响应进行 Beer-Lambert 衰减定律^[30]的指数拟合,其 11 m 和 21 m 传输光纤系统的拟合度 R^2 分别为 0.9685 和 0.9941。从误差棒数据可以明显地看到放电电极模型放电的不稳定性,但荧光光纤传感系统对局放信号仍有很好的响应。实验结果表明,基于荧光光纤的全光纤传感系统可以实现在空间范围 86 cm 内的长距离传输供电系统的局放故障检测。

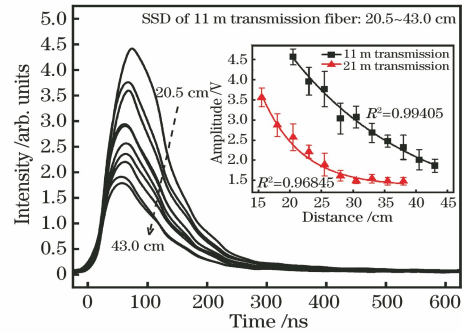


图 5 不同长度传输光纤检测的局放响应和 SSD 关系
Fig. 5 Relationship between partial discharge response and SSD in transmission fiber with different lengths

4 结 论

将荧光光纤作为传感器、SiPM 作为探测器,结合真空装置模拟气压变化时局放故障信号响应特性。将其与电流互感器的数据作对比,得到了局放故障信号的光、电波动特性,获得了气压为 50~4 kPa 时,对应轨道高度为 5.5~20.5 km 的局放光信号响应。结合传感器与局放模型在实验舱的空间分布位置,得到了传感器在直径为 86 cm 时的响应。接下来对传感光纤的荧光特性进行优化设计,这将有助于深入研究在更高空间的航空器、航天器的局放故障特性。

参 考 文 献

- [1] Mason J H. Breakdown of insulation by discharges [J]. Proceedings of the IEE-Part IIA: Insulating Materials, 1953, 100(3): 149-158.
- [2] Tanaka T. Internal partial discharge and material degradation [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(6): 899-905.
- [3] Javed H, Li K, Zhang G Q, et al. Online monitoring

- of partial discharge by measuring air decomposition by-products under low and high humidity [J]. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science*, 2017: 186-191.
- [4] Zachariades C, Shuttleworth R, Giussani R, et al. Optimization of a high-frequency current transformer sensor for partial discharge detection using finite-element analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(20): 7526-7533.
- [5] Park S, Jung K Y. Design of a circularly-polarized UHF antenna for partial discharge detection [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 81644-81650.
- [6] Akashah N A, Rohani M H, Rosmi A S, et al. A review: partial discharge detection using acoustic sensor on high voltage transformer [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1432: 012004.
- [7] Wu C X, Wang L T, Fang N, et al. Experimental study of fiber-optic ultrasonic wave sensing based on self-mixing interference effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(z1): s106005.
吴春旭, 王陆唐, 方捻, 等. 基于自混合干涉效应的超声波光纤传感实验研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(z1): s106005.
- [8] Liu K M, Han K J, Li J, et al. Research progress of partial discharge detection on optical methods [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(1): 100-103, 119.
刘克民, 韩克俊, 李军, 等. 局部放电光学检测技术研究进展 [J]. *电子测量技术*, 2015, 38(1): 100-103, 119.
- [9] Yoshimura N, Nishida M, Noto F. Light emission from tracking discharges on organic insulation [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1984, 19(2): 149-155.
- [10] Deng J D, Xiao H, Huo W, et al. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(5): 305-311.
- [11] Zou Z J, Qin Z B, Li Y Y, et al. Optimization design of fiber optic ultrasonic sensor based on coupling cone structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306004.
邹子杰, 秦忠宝, 李易依, 等. 基于耦合锥结构的光纤超声传感器优化设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306004.
- [12] Lundgaard L E. Partial discharge. XIII. acoustic partial discharge detection-fundamental considerations [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1992, 8(4): 25-31.
- [13] Wang W Q. *Near-space remote sensing [M]*. Heidelberg: Springer, 2011.
- [14] Zhou Y Y, Xiao Y C, Sun L J, et al. Optical-fiber fluorescent probes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 010003.
周艳焰, 肖永川, 孙力军, 等. 光纤荧光探针 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 010003.
- [15] Zhao W H, Zhang X D, Jiang J G, et al. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(5): 955-957.
赵文华, 张旭东, 姜建国, 等. 尖-板电晕放电光谱分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(5): 955-957.
- [16] Chen S X, Sun Y L. Light spectra on DC corona [C]// *Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma*, September 30, 1998, Toyohashi, Japan. New York: IEEE Press, 1998: 321-324.
- [17] Okubo H, Hayakawa N, Matsushita A. The relationship between partial discharge current pulse waveforms and physical mechanisms [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(3): 38-45.
- [18] Nyamupangedengu C, Jandrell I R. Partial discharge spectral response to variations in the supply voltage frequency [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(2): 521-532.
- [19] Peng Q J. Study on chemical model of streamer discharge plasma in air and analysis of its influencing factors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 2-32.
彭庆军. 空气中流注放电等离子体化学模型研究及其影响因素分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 2-32.
- [20] Luque A, Ebert U. Electron density fluctuations accelerate the branching of positive streamer discharges in air [J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2011, 84(4): 046411.
- [21] Rabaud M, Couder Y, Gerard N. Dynamics and stability of anomalous Saffman-Taylor fingers [J]. *Physical Review A, General Physics*, 1988, 37(3): 935-947.
- [22] Huang J, Yang L, Chen L, et al. Methods for diagnosing air switch plasma via laser interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0512003.
黄杰, 杨林, 陈磊, 等. 激光干涉法诊断空气开关等离子体的技术研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0512003.
- [23] van Brunt R J. Stochastic properties of partial-discharge phenomena [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991, 26(5): 902-948.
- [24] Chen J Y. A precise formula of atmospheric pressure

- and height [J]. Journal of Dali Teachers College (Natural Science Edition), 1994(1): 46-49.
- 陈竞余. 大气压强与高度的精密公式[J]. 大理师专学报(自然科学版), 1994(1): 46-49.
- [25] Hartman D H. Pulse mode saturation properties of photomultiplier tubes [J]. Review of Scientific Instruments, 1978, 49(8): 1130-1133.
- [26] Driessen A B J M, van Duivenbode J, Wouters P A A F. Operational conditions influencing the partial discharge performance of cables under low and medium vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 81-89.
- [27] Loveless A M, Garner A L. A universal theory for gas breakdown from microscale to the classical Paschen law[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(11): 113522.
- [28] Rui R, Cotton I. Impact of low pressure aerospace environment on machine winding insulation[C]//2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 6-9, 2010, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [29] Chu J R, Liu Z F, Wang Z M. Plastic optical fiber standard for communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(4): 44-47.
- 储九荣, 刘志飞, 王则民. 通信用塑料光纤标准[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(4): 44-47.
- [30] Corsi F, Dragone A, Marzocca C, et al. Modelling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 572(1): 416-418.