

可拆卸式深紫外光纤真空馈通结构

郑一鸣 林文豫 吴俊 王旭迪*
(合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

Detachable Deep Ultraviolet Fiber Optic Vacuum Feedthrough Structure

ZHENG Yiming, LIN Wenyu, WU Jun, WANG Xudi*
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract Charge management in space gravitational wave detection relies on utilizing the photoelectric effect of deep ultraviolet light to neutralize stray charges on the inertial sensor's surface. A pivotal component for this task is the vacuum feedthrough, facilitating the introduction of the deep ultraviolet fiber while maintaining the vacuum integrity of the inertial sensor. This paper proposes a detachable vacuum fiber feedthrough structure, featuring a stepped countersink design in the metal housing to securely couple with the bare deep ultraviolet fiber. The seal between the metal housing and the flange is achieved through internal screw compression of the flexible material. The design of the vacuum fiber feedthrough structure is detailed, and its performance is evaluated by measuring the overall structure leakage rate using helium mass spectrometry and the optical transmission loss with an optical power meter. Experimental results indicate a vacuum leakage rate of less than $1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for the designed feedthrough structure, with an optical power loss of less than 0.5 dB when transmitting deep-ultraviolet light. These findings demonstrate the suitability of the proposed structure for meeting the charge management requirements of both ground-based and space-based gravitational wave detection experiments, ensuring the normal operation of gravitational wave detection.

Keywords Vacuum fiber optic feedthrough, High vacuum, Deep-ultraviolet light transmission, Charge management system

摘要 空间引力波探测中需要利用深紫外光的光电效应中和检验质量上积累的电荷,实现电荷管理。真空馈通是引入深紫外光纤的关键组件,须在实现电荷管理的同时确保惯性传感器真空度。文章提出了一种可拆卸的真空光纤馈通结构,通过金属套管的阶梯沉孔结构设计实现与深紫外裸光纤密封耦合,结合内螺钉压紧柔性材料获得金属套管与法兰的可拆卸密封。介绍了真空光纤馈通结构的设计与制作流程,通过氦质谱和光功率计测量了整体结构的泄漏率以及光传输损耗。实验结果表明,所设计的馈通组件的真空漏率小于 $1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,传输深紫外光时的光功率损耗低于 0.5 dB,能够满足地面和太空实验对电荷管理的需求,保障引力波探测正常进行。

关键词 真空光纤馈通 高真空 深紫外光传输 电荷管理系统

中图分类号: TH89 文献标识码: A doi: [10.13922/j.cnki.cjvst.202402007](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202402007)

在先进仪器和表面科学等众多真空应用领域中需要将不同波长的光引入到真空环境中探索光与物质的相互作用,真空光纤馈通就成为了光传输和真空密封的关键结构。例如:在冷原子实验^[1]中,激光通过馈通结构传输到真空腔的特定区域冷却

原子。粒子物理研究需要向粒子加速器内部引入光纤,实现精确的探测和数据传输^[2],以及在扫描隧道显微镜中进行阴极发光测量^[3]。此外,先进半导体工艺制程中也离不开光纤真空馈通结构实现高真空环境下的测量和通信。

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2202504)

* 联系人: E-mail: wuxudi@hfut.edu.cn

空间引力波探测中,惯性传感器作为关键测量元件^[4-5],其内部的测试质量块在轨运行期间需保持自由悬浮状态,而太空中的空间电离辐射会导致测试质量上的电荷累积,引入额外的静电力噪声,影响测量精度^[6-7]。深紫外光(DUV)的光电效应可以有效中和质量块表面的杂散电荷,这一非接触方式被用于测试质量的电荷管理^[8-9]。在不影响惯性传感器内部真空环境的情况下引入深紫外光,必须使用特定的真空光纤馈通结构^[10]。电荷管理任务为此提出的要求是,希望真空光纤馈通的整体漏率低于 $1.0 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,光纤插入传输损耗小于3 dB。此外,真空光纤馈通必须与电荷管理的地面和太空实验兼容^[11],而地面实验不可避免地需要反复调节光纤馈通的位置。这些需求对本身脆弱且易磨损的光纤提出了挑战。

根据光纤的密封方式,可以将真空光纤馈通分为两种类型。图1(a)是固定式,采用胶水灌封或焊接的密封形式,实现光纤和馈通主体的真空密封。如Clément等^[12]设计的基于紫外线固化粘合剂的光纤馈通,可用于高真空系统,固化后的光纤和整个法兰是一体的。图1(b)是可拆卸式,目前研究中多采用可压缩套圈挤压光纤形成真空密封。如Buchholz等^[13]设计的一种可替换、无压缩、紧凑、

可重新密封且具有应力消除效果的馈通装置,适合脆弱光纤件的真空馈入,不足之处在于泄漏率为 $0.41 \pm 0.04 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,长期使用仍然会对高真空环境带来负面影响。前一种形式简单可靠,但是光纤本身属于脆弱结构,一旦损坏,光纤无法更换,会造成整个光纤馈通的报废。后一种形式为了保证挤压密封的效果,需要在挤压力和配合公差之间做到很好的平衡。当施加的挤压力较小时,为保证密封效果须对馈通主体和套圈的孔口进行严格的公差控制^[14-15]。当套圈挤压光纤的力较大时,会降低光纤的使用寿命甚至导致其直接开裂。目前的研究中,光纤真空馈入的实现均采用这两种方式,带来上述问题的同时,缺乏对其设计的真空密封性和光传输损耗的全面评估^[16-18]。本文根据引力波探测中电荷管理系统的需求,设计了一种可拆卸的真空光纤馈通,裸光纤外部耦合金属保护套管,内嵌式螺钉挤压柔性密封件形成整体密封,在实现真空密封的同时有效传输深紫外光。为了评估该结构是否满足要求,加工了一套真空馈通测试组件,借助氦质谱和深紫外发光二极管(LED)光源测试了整个馈通的泄漏率和250 nm波段光损耗。为进一步评估密封力对光纤的潜在影响,通过改变对螺钉施加的扭矩,对不同密封程度下馈通的密封性能以及光传输损耗情况进行了详细测试。

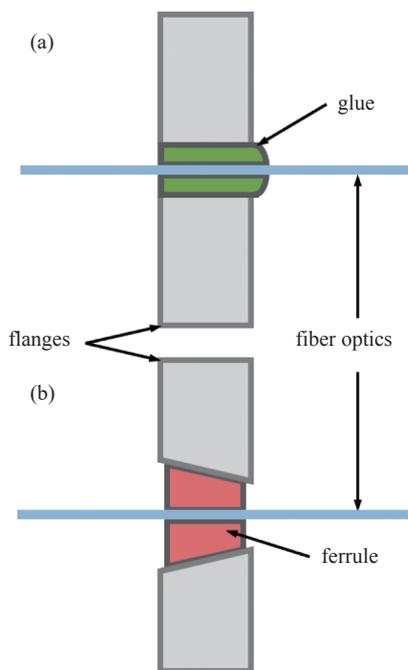


图1 光纤真空馈通的密封形式。(a)一体式,(b)可拆卸式
Fig. 1 Sealing forms of fiber optic vacuum feedthroughs.
(a) One-piece style, (b) detachable style

1 新型光纤馈通结构

新型光纤馈通采用基于法兰的可拆卸真空馈入设计,法兰内部安装一小段光纤。标准法兰接口可以安装到真空系统,光纤一端的SMA905连接器可以接入外部光路,实现良好的光传输。馈通结构由四部分组成(图2),一个基于标准CF法兰的馈通主体,一个类似球头的回转体聚四氟乙烯(PTFE)柔性密封件,一个用于旋紧密封的通孔螺钉,以及一个裸光纤和金属套管耦合的光纤主体。裸光纤和细小的金属管之间通过光纤固化胶形成可靠的密封,金属管可以保护光纤免受挤压力的影响。这样可以施加更大的挤压力保证密封性,避免了高精度的机械加工。各个组件及其功能实现将在下面详细讨论。

1.1 馈通主体

馈通主体是基于标准CF法兰的改进结构,可以插入光纤组件。一端可以耦合密封件和通孔螺

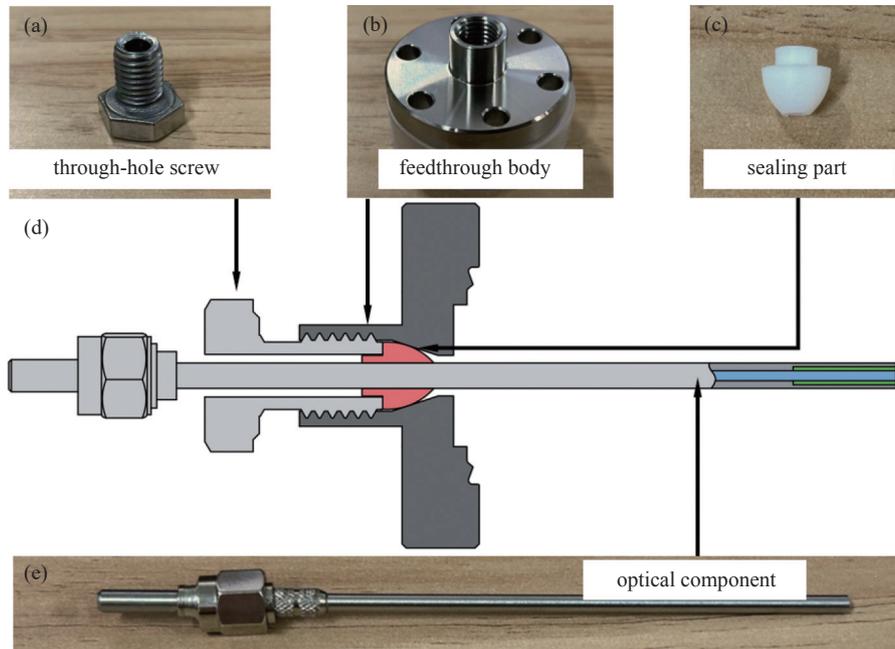


图2 光纤真空馈通结构及组成图。(a)通孔螺钉, (b)馈通主体, (c)密封件, (d)馈通整体结构, (e)光纤主体

Fig. 2 Fiber optic vacuum feedthrough structure and composition diagram. (a) Through-hole screw, (b) feedthrough body, (c) sealing part, (d) feedthrough overall structure, (e) optical component

钉,形成光馈通整体,另一端的法兰面可以保证和真空室等部件配合。如图2(b)所示,馈通主体内攻有螺纹可以与通孔螺钉配合。

1.2 通孔螺钉

通孔螺钉是标准件,型号为M8×10六角头螺栓,钻有直径4.4 mm的通孔,确保光纤主体插入其中,密封件的一端也可以插入其中进行固定。整个馈通的密封力来自于对通孔螺钉施加的旋紧扭矩,由此产生的轴向推力作用到密封件上,在球头的接触切线上分化出垂直于密封面的力,产生密封效果。

1.3 密封件

密封件作为一种回转体结构,可以通过车床方便的加工出来。通过螺钉旋紧,轴向推动密封件与馈通主体接触,挤压密封件产生形变,使得密封件与光纤主体和馈通主体紧密贴合,形成真空密封。形状上如图2(c)所示,一端为圆柱体结构,起导向作用,另一端的剖切面外轮廓为弧线,起到与馈通主体接触密封的作用。与两个平面间的接触不同,在相同的作用力下,弧形与平面的接触形变更大,挤压带来的密封效果更好。在整个密封件上钻有轴向通孔,可以插入光纤主体。密封件和光纤金属套管的高表面质量可以保证密封的可靠性,避免泄漏的产生。

密封件要求能够容易发生形变,且与真空兼容。PTFE在真空环境中具有低释气性,相关报道^[19]中测得其真空放气率低至 $10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 数量级,且能够耐受真空烘烤的高温,是真空中常用的材料。此外,PTFE是一种柔性材料,作为密封件套在光纤主体上不会划伤金属套管表面,可以避免潜在的泄漏。

1.4 光纤主体

光纤主体由外部的金属套管和内部的深紫外裸光纤组成,两者之间的耦合是保证整个馈通真空性能和光学性能的关键。如果在金属套管两端进行密封,由于光纤和金属套管的热膨胀系数不同,当外部环境发生变化时,细长的光纤和金属套管会在轴线方向上产生应力甚至微小形变,这会对光纤造成破坏。基于这种情况,只在金属套管的一侧进行密封,选择尾部作为密封面可以避免金属套管和光纤的间隙残留的气体向真空侧逸出,影响真空环境。深紫外光纤根据径向由内到外,依次由纤芯、包层、涂覆层、保护层等组成。纤芯和包层的主体均为 SiO_2 ,包层的折射率低于纤芯,以保证光进行全反射传输,一般通过掺杂氧化物实现。为保证深紫外光的传输,会在纤芯中提高羟基($-\text{OH}$)的含量,包层中掺氟以提高光纤的耐紫外光辐照性能。

光纤的包层是紧密包裹纤芯的,如图3中所示两者之间不会存在空隙,因为空隙的存在意味着会发生漏光。而涂覆层可能存在不完全涂覆的情况,导致保护层和涂覆层之间存在间隙。为了保证密封性,将光纤剥离至包层后,再和金属套管进行固化胶的密封。

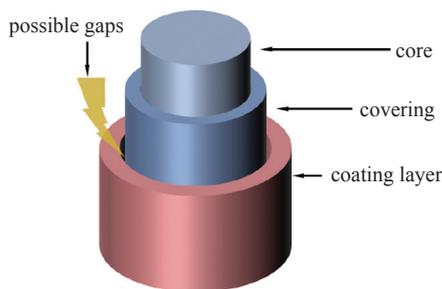


图3 光纤的内部结构图

Fig. 3 Diagram of the internal structure of an optical fiber

在金属管的尾部设置阶梯沉孔(图4所示),将裸光纤插入其中并在尾部露出一定长度,然后将混合好的光纤固化胶液体(353ND,一种光纤固化胶)注入到阶梯沉孔。沉孔被固化胶填充后,将光纤主体静置一段时间,以排出固化胶注入过程中可能带来的气泡。固化胶是热固性的,之后需要对其进行加热固化,将温度控制在 80°C 并维持 20 min 。由于表面张力的作用,固化胶将整个沉孔填满后会溢出一定的高度。需在胶水固化后,对端面进行研磨处理,使光纤和金属管平整至同一平面,并尽可能使端面光滑,以增大通光率降低光损。为使光纤件能够和外外部光路连接,光纤件的前端耦合了SMA905接头结构。

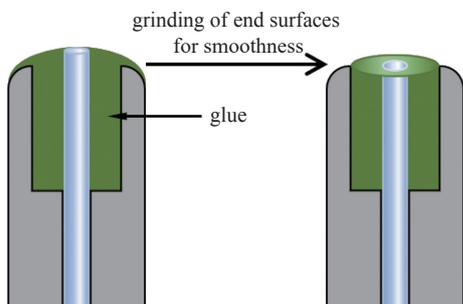


图4 光纤与金属管的耦合过程

Fig. 4 Coupling process between optical fiber and metal tube

2 性能测试

2.1 漏率检测

不同挤压程度下的密封件会带来不同的真空

密封性能。馈通中的密封力由螺钉的预紧力提供,预紧力的大小取决于对螺钉施加的扭矩。另外,光纤件金属管的通孔较长,并且直径很小,胶水在固化过程中极有可能存在气泡和裂纹等缺陷,很难实现完全密封。在使用过程中,一些碰撞和振动甚至是温度上的变化可能让内部的小缺陷连接成更大的裂隙,成为整个光纤件内的泄漏通道。为了探究整个结构的真空表现,使用氦质谱检漏仪对整个光纤馈通结构进行漏率测试。检漏仪接口为KF25法兰接口,与光纤馈通的CF16法兰进行连接,需要在中间通过转接管来完成连接。将整个结构件连接到氦质谱检漏仪(PHOENIX Magno, Leybold)上,在室温下对馈通整体喷氦检漏,测试不同扭矩下馈通装置的漏率,探究PTFE密封件带来的整体密封效果。

对通孔螺钉施加扭矩至 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 后,打开氦质谱进行检漏。图5记录了测试过程中氦质谱示数的变化,可以看到 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 下,馈通结构存在泄漏,随后将扭矩增加到 $7\text{ N}\cdot\text{m}$,观察到漏率迅速下降至氦质谱的探测下限 $1.0\times 10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,表明 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 下的馈通结构形成了真空密封,但是具体的密封效果要进行喷氦检测。对馈通结构喷氦,漏率随之发生变化,升高到 $6.6\times 10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 后开始下降,这种迅速的响应可以认为是有氦气通过馈通结构进入到了氦质谱检漏仪中。逐步增加扭矩至 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,在每次增加扭矩后进行喷氦处理,观察到漏率发生了波动,最高升至 $1.6\times 10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,低于氦质谱的本底漏率水平 $5.0\times 10^{-13}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

这表明密封件带来了很好的真空密封效果,在

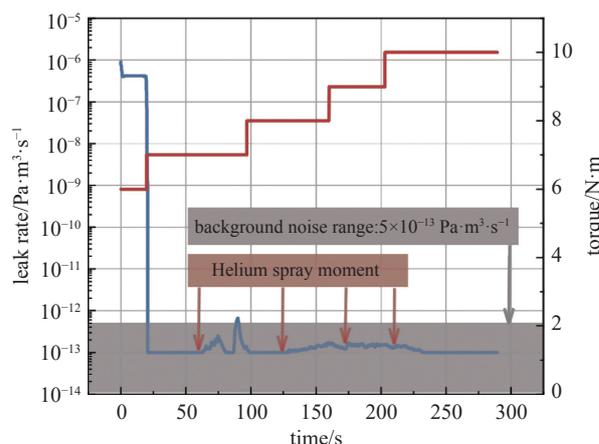


图5 真空光纤馈通的漏率测试情况

Fig. 5 Leakage test results for vacuum fiber optic feedthroughs

10 N·m 下几乎不发生泄漏,即使是扭矩稍小的 7 N·m 下,整个真空光纤馈通的漏率也只有 $6.6 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,可以认为真空光纤馈通整体漏率是小于 $1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的,比电荷管理任务提出的漏率要求低一个数量级。

2.2 光纤损耗检测

光纤性能的核心指标之一是光在其中传输的损耗。为评估光纤真空馈通的性能,采用深紫外 LED 光源和光功率计进行精确的光损耗检测,如

图 6 所示。光源的输出波长可在 190 nm ~ 2500 nm 之间调节。电荷管理中主要采用 250 nm 波段附近的深紫外光,因此选择了该波段对真空光纤馈通进行光损耗测试。光纤的损耗 α 与进出光纤的功率之间存在这样的关系:

$$\alpha = 10 \lg \frac{P_0}{P_i} \quad (1)$$

其中 P_0 是输入功率 (mW); P_i 是输出功率 (mW); 光纤损耗 α 单位是分贝 (dB), 表示两个功率的相对差异。

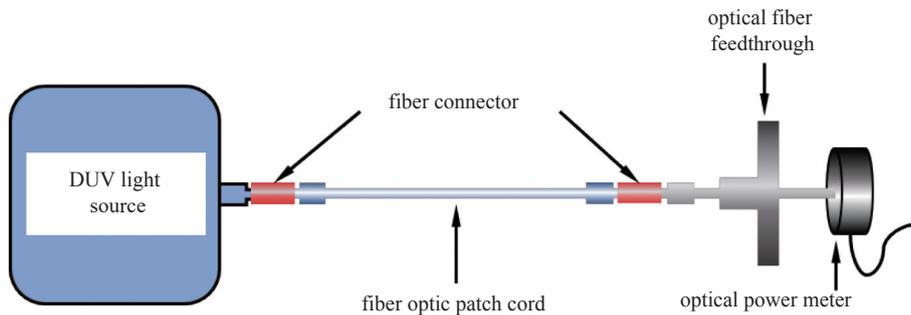


图6 真空光纤馈通损耗传输测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fiber optic feedthrough loss transmission measurement

通过对深紫外 LED 光源进行仔细调校,确保仪器显示的输出光功率可以保持稳定(通过调控电流实现输出功率的调节)。受限于光源和馈通的结构,无法将光源直连到真空馈通上,因此在光源和真空馈通之间连接一段光纤跳线,光纤跳线尾端作为 0 dB 参考点。

将电流调节到 1 mA, 光纤跳线的输出功率稳定在 382 nW。记录了光纤件在馈通主体内部受到密封件不同程度挤压下的输出光功率变化,挤压程度用施加在通孔螺钉上的扭矩来表征,这样能直接反映使用中实际情况。不同扭矩下光损的测量有助于评估密封件对光纤金属管的挤压是否对内部裸光纤产生影响,特别是裸光纤对深紫外光传输的表现。

从 0 N·m 到 10 N·m, 每次将扭矩增加 1 N·m, 得到这些扭矩下的光损值,结果如图 7 所示。在 0 ~ 3 N·m 的范围内,光功率的传输损耗值稳定不变均为 0.400 dB,考虑到光纤件和密封件之间存在配合间隙,密封件受到的挤压力还没有作用到光纤件上。继续增加扭矩,光损耗在 0.4 dB 附近产生了轻微的波动。上述对漏率的测试表明,当扭矩达到 7 N·m 时,密封件可以形成很好的真空密封。因此光损关注的重点在形成真空密封的扭矩范围内,在

图 7 中可以得到这一范围内光损值并没有出现逐步增大的趋势。0 ~ 10 N·m 测得的数据整体波动在均值 0.399 dB 的 5% 以内。可以说明,密封件的挤压,对深紫外光在光纤中的传输并没有产生明显影响,随着扭矩的增加,馈通的光损耗维持在 0.4 dB 附近,整体光损始终低于 0.5 dB。

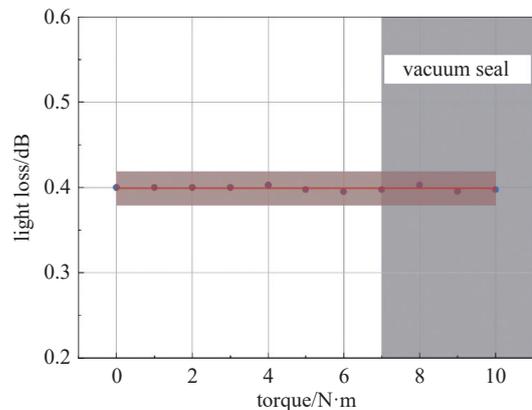


图7 不同扭矩下深紫外光的传输损耗情况

Fig. 7 Transmission loss of deep ultraviolet light at different torques

3 结论

本文介绍了一种可拆卸的新型真空光纤馈通,

可以嵌入真空兼容的 PTFE 压缩密封件。密封件在法兰主体和光纤金属保护管之间受到挤压从而形成真空密封,密封件类似球头的结构可以保证与法兰主体很好的贴合。金属保护管在确保密封力足够的同时,避免了光纤上受到集中的应力,保证了深紫外光传输性能,延长了光纤的使用寿命。光纤和金属管通过光线固化胶进行耦合兼顾了真空密封和通光性。这种馈通结构适用于高真空环境中的惯性传感器和其他光学馈入场景。选用市面上销售的通孔螺钉进行紧固,这不仅增强了元件的可替换性,还降低了成本。此外,这种馈通结构还可以去掉小段光纤元件,将光路中的整根光纤插入馈通中。这种解决方案可减少光纤连接的数量,最大限度地降低光纤连接损耗,从而进一步提高整个光路的深紫外光传输效率。

参 考 文 献

- [1] Rushton J A, Aldous M, Himsworth M D. Contributed review: The feasibility of a fully miniaturized magneto-optical trap for portable ultracold quantum technology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 121501
- [2] Danisi A, Soto J L B, Gomez A, et al. Final design of the fiber-optic current sensor bundle in the ITER buildings[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 17(01): C01053
- [3] Kirilov K M, Denkova D, Tsutsumanova G G, et al. Note: Simple vacuum feedthrough for optical fiber with Sub-Miniature version a connectors at both ends[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(7): 076107
- [4] Yang F, Bai Y, Hong W, et al. A charge control method for space-mission inertial sensor using differential UV LED emission[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(12): 124502
- [5] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010
- [6] Taioli S, Dapor M, Dimiccoli F, et al. The role of low-energy electrons in the charging process of LISA test masses[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, 40(7): 075001
- [7] Schulte M O, Shaul D N A, Hollington D, et al. Inertial sensor surface properties for LISA Pathfinder and their effect on test mass discharging[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(9): 094008
- [8] Kenyon S P, Letson B, Clark M, et al. A charge management system for gravitational reference sensors—design and instrument testing[C]//2021 IEEE aerospace conference (50100). IEEE, 2021: 1-9
- [9] Antonucci F, Cavalleri A, Dolesi R, et al. Interaction between stray electrostatic fields and a charged free-falling test mass[J]. *Physical review letters*, 2012, 108(18): 181101
- [10] Ziegler T, Bergner P, Hechenblaikner G, et al. Modeling and performance of contact-free discharge systems for space inertial sensors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1493–1510
- [11] Weber W J, Bortoluzzi D, Bosetti P, et al. Application of LISA gravitational reference sensor hardware to future intersatellite geodesy missions[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3092
- [12] Clément J F, Bacquet D, Szriftgiser P. Ultraviolet curing adhesive-based optical fiber feedthrough for ultrahigh vacuum systems[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2010, 28(4): 627–628
- [13] Buchholz B, Ebert V. Compact, compression-free, displaceable, and resealable vacuum feedthrough with built-in strain relief for sensitive components such as optical fibers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(5): 055109
- [14] Abraham E R I, Cornell E A. Teflon feedthrough for coupling optical fibers into ultrahigh vacuum systems[J]. *Applied optics*, 1998, 37(10): 1762-1763
- [15] Harbour P J. Miniature demountable two-channel electric feedthrough for high-vacuum use[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1965, 36(11): 1657–1658
- [16] Thomes Jr W J, LaRocca F V, Switzer R C, et al. Vibration performance comparison study on current fiber optic connector technologies[C]//Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing IV. SPIE, 2008, 7070: 75–89
- [17] Reinsch T, Cunow C, Schrötter J, et al. Simple feedthrough for coupling optical fibres into high pressure and temperature systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(3): 037001
- [18] Peerzada A R, Jobson C M, Kassa E, et al. Versatile optical fiber feedthroughs for ultra-high vacuum applications[J]. *Vacuum*, 2020, 180: 109542
- [19] Luo Y, Wu X, Wang K, et al. Comparative study on the outgassing rate of materials using different methods[J]. *Mapan*, 2016, 31: 61–68