

综述

空间引力波探测中电荷管理系统的紫外光源应用*

阮远东¹⁾ 章志昊¹⁾ 贾苙嫒¹⁾ 顾煜宁¹⁾ 张善端¹⁾崔旭高¹⁾ 洪葳²⁾ 白彦峥²⁾ 田鹏飞^{1)†}

1) (复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

2) (华中科技大学物理学院, 武汉 430074)

(2024 年 8 月 9 日收到; 2024 年 10 月 3 日收到修改稿)

引力波是物质和能量的剧烈运动和变化所产生的一种物质波, 通过探测引力波可以使得人类从另一个角度去观测宇宙. 在空间引力波探测的过程中, 惯性传感器中的检验质量会受到太空环境中粒子和射线的作用而积累电荷, 影响了引力波探测的精度, 因此需要对检验质量上的电荷进行控制, 即开展电荷管理. 在以往的电荷管理系统中应用紫外汞灯和紫外 (UV) LED 作为光源, 取得了不同的效果. 本文主要综述了空间引力波探测中电荷管理系统的紫外光源研究进展. 汞灯作为第 1 代系统光源, 虽能完成任务, 但有着启动慢、功耗高等缺点. UV LED 凭借其体积、功耗等方面的优点, 逐步成为目前电荷管理系统的光源. 近年来, 随着紫外微型 LED (UV micro-LED) 技术的成熟, 其较高的外量子效率和良好的可靠性展示出应用于电荷管理系统的潜力, 是未来电荷管理系统可选择的紫外光源之一.

关键词: 电荷管理, 深紫外, LED, 微型 LED**PACS:** 04.30.-w, 04.80.Nn, 85.30.-z, 95.55.Ym**DOI:** 10.7498/aps.73.20241115**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241115

1 引言

近年来, 随着研究人员对太空的不断探索, 对空间中存在的某些特殊物质、现象都有了逐步深入的理解, 其中引力波探测便是目前研究的热点之一. 所谓引力波 (gravitational waves, GWs), 在物理学中是指时空弯曲中的涟漪, 通过波的形式从辐射源向外传播, 这种波以引力辐射的方式传输能量, 目前普遍认为其是由超大质量物体或高能宇宙事件相互作用引起的时空曲率波纹^[1,2]. 通过探测和分析引力波所携带的信息, 人类可以用一种前所未有的方式去研究天体活动与宇宙起源, 给物理学、天文学等学科带来积极影响.

1916 年, 爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在, 而直到 2015 年 Collaboration 和 Aasi^[3] 才首次直接探测到引力波. 为了得到更加清晰的测试结果, 拓展引力波探测的频段, 如欧洲航天局 (ESA) 和美国航天局 (NASA) 的激光干涉空间天线 (Laser Interferometer Space Antenna, LISA) 计划, 中国的太极、天琴计划以及日本的分赫兹干涉引力波天文台 (Deci-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory, DECIGO) 计划等空间引力波探测任务被提出, 并成为了近年来天文学和物理学领域中的一项重要技术和研究方向. 在空间引力波探测过程中, 研究人员发现测试系统核心之一的检验质量表面在探测过程中会因受到宇宙射线、高能粒子等影响而产生电荷积累, 进而对引力波的探测

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFC2202503) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pftian@fudan.edu.cn

精度产生严重影响. 因此, 需要对这部分电荷进行控制, 即开展电荷管理. 多年来, 电荷管理系统的框架、结构、光源选择、光纤连接方式等一直发生改变, 为了使电荷管理系统的发展目标、方向更为清晰明确, 需要总结电荷管理系统的发展历程, 展望其未来的发展趋势.

本文第 2 节简要介绍引力波探测的发展过程及电荷管理的基本原理; 第 3 节介绍紫外汞灯、紫外 (UV) LED 在各种电荷管理任务中的具体应用; 第 4 节介绍紫外微型 LED (UV micro-LED) 在电荷管理系统中的初步研究; 第 5 节为本文小结.

2 引力波探测

2.1 引力波探测发展历程

1915 年, 爱因斯坦发表了场方程, 提出了广义相对论并预言了引力波的存在; 1974 年, 哈尔斯-泰勒双星系统现象的发现为引力波的存在提供了首个间接证据; 2002 年, 世界上第一个大型引力波探测项目激光干涉引力波天文台 (The Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, LIGO) 开始运行; 2015 年, 为 LISA 计划做准备的技术演示任务 LISA 探路者号 (LISA Pathfinder, LPF) 发射; 同年, 研究人员利用 LIGO 首次直接探测到引力波, 标志着天文学进入了新的时代, 人类从此有了一扇新的窗口去观测宇宙的奥秘. LIGO 探测引力波采用了激光干涉的原理, 如图 1 所示. 一束激光从激光器中发出, 经过一面 45° 倾斜放置的分束器, 分成两束垂直方向传播的激光, 到达两个反射镜后, 沿原路返回并发生干涉. 通过调整两臂的长度, 控制两束光相消, 探测器上没有光信号. 当有引力波经过探测器时, 使探测器周围的空间在一个方向上拉伸, 同时在另一个方向上压缩, 两束激光产生光程差, 探测器上的光强就会发生明显变化, 以此得到引力波信号. 目前, 作为地面引力波探测计划之一的 LIGO 由于受到地球上振动噪声的影响, 能够探测的引力波频率主要集中在 $10\text{ Hz}—1\text{ kHz}$ 范围^[4,5]. 相比之下, 空间引力波探测能够探测到的频带更低, 主要集中在 $0.1\text{ mHz}—1\text{ Hz}$, 可以与地面引力波探测计划相互补充.

ESA 和 NASA 提出了基于激光干涉仪探测低频引力波的 LISA 计划^[6,7]. LISA 计划发射 3 个相同的航天器, 构成距离太阳 1 AU ($1.5\times 10^8\text{ km}$),

边长约为 $2.5\times 10^6\text{ km}$ 的近似等边三角形结构, 如图 2(a) 所示, 每个航天器上都配备有惯性传感器等相应的测量装置^[8]. 三角形结构的中心在地球公转轨道上落后地球约 20° , 与黄道平面的夹角约为 60° , 见图 2(b). 当探测区域内有引力波经过时, 两个检验质量之间的距离会发生改变, 此位移变化量由激光干涉仪测量. 2016 年, LPF 任务成功验证了卫星姿态控制精确度满足引力波探测的要求. 目前, LISA 计划完成了关键预研阶段, 并正式进入了实际的设计和建造阶段, 预计于 2034 年发射.

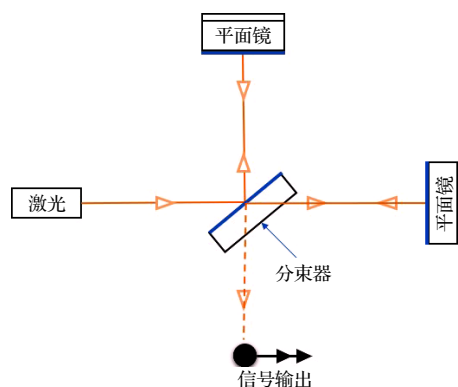


图 1 激光干涉原理, 通过引力波带来两臂光程差的变化, 得到信号输出

Fig. 1. Principle of laser interferometry, the change in the optical path difference between the two arms due to gravitational waves results in the signal output.

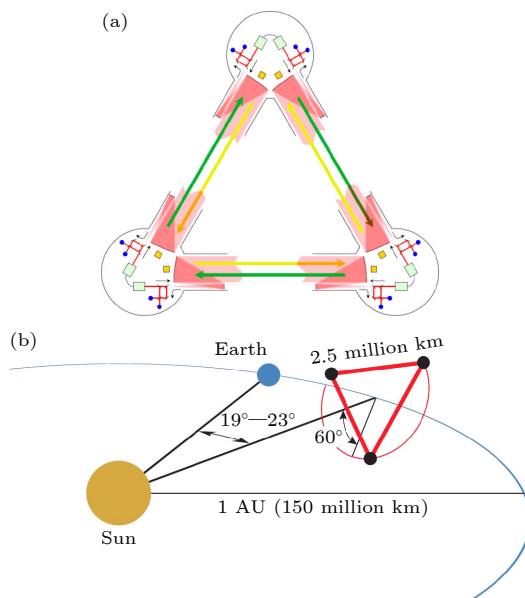


图 2 LISA 引力波探测计划^[8]: (a) 3 个航天器构成三角形结构; (b) 3 个航天器绕着太阳转动

Fig. 2. LISA gravitational wave detection mission^[8]: (a) The three spacecraft form a triangular structure; (b) the three spacecraft orbit around the Sun.

与此同时,我国为了探测引力波也提出了太极计划^[9]和天琴计划^[10-12].其中太极计划由中国科学院提出,预计发射三颗卫星组成类似于 LISA 计划的编队,其星间距初步设计为 3×10^6 km,主要测量中低频段的引力波.天琴计划由中山大学和华中科技大学为首的科研团队共同发起,如图 3 所示,天琴计划预计发射三颗卫星在距离地球 10^5 km 绕地轨道上构成一个三角形的结构,其探测波源为双白矮星系统 RXJ0806.3+1527^[10].2019 年 8 月,我国首颗空间引力波探测技术实验卫星“太极一号”成功发射,标志着“太极计划”第一步任务目标已成功实现.“天琴一号”于同年 12 月发射,成功进入预定轨道并完成无拖曳控制飞行验证等科研任务,为之后的引力波探测任务打下坚实基础.

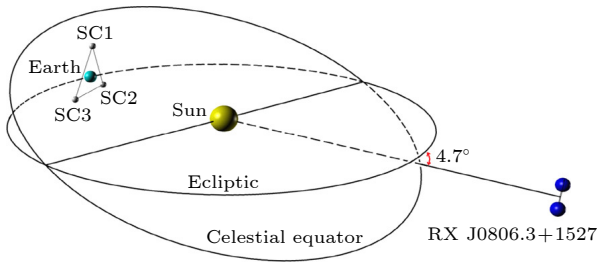


图 3 天琴引力波探测计划的初步概念,以 J0806 为参考源,3 艘“天琴号”航天器分别表示为 SC1, SC2 和 SC3,还显示了赤道平面,以及天空中朝向 J0806 的方向^[10]

Fig. 3. Preliminary concept of the TianQin gravitational wave detection mission with J0806 as the reference source. The three “TianQin” spacecraft are denoted as SC1, SC2, and SC3, and the equatorial plane as well as the direction towards J0806 in the sky are also shown^[10].

作为国际合作的先锋项目, LISA 计划代表了激光干涉引力波探测的前沿.其最大的特色在于具有强大的国际合作背景,具备深厚的技术储备和多年太空任务经验.天琴计划的特色在于其基于地心轨道的独特布局,这种配置可以稳定卫星编队,减少干扰,提升探测精度.太极计划是以太阳轨道为布局的多颗卫星系统,最终目标是形成稳定、精确的 3 颗卫星编队,这种设计不仅可以提高引力波探测的灵敏度,还可以覆盖更广的频率范围. LISA 计划得益于其国际合作与技术领先地位,而天琴计划则在成本控制和早期验证方面具有优势,太极计划在灵敏度方面较 LISA 更有优势.三者的互补性表明,通过更广泛的国际合作与技术交流,可能实现更加全面的引力波探测布局.这些计划各具特色,进一步合作和共享资源将有助于推动全球引力

波天文学的发展.

2.2 电荷管理

空间惯性传感器是空间引力波探测计划的关键载荷之一,其具有高精度、小量程和多自由度实时测量的特点.图 4 为 LISA 计划中惯性传感器敏感探头的结构示意图^[7].对于空间引力波探测而言,通常要求惯性传感器的测量精度达到 $10^{-15} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ 量级^[13].然而,在航天器的飞行过程中,宇宙中的高能粒子和宇宙射线会穿过航天器的外壳,到达惯性传感器中检验质量的表面,使检验质量不断地充电^[14,15],当检验质量表面的电荷超过一定阈值后,检验质量和周围导体之间的静电力就会带来不可忽视的加速度噪声,从而影响惯性传感器的测量精度,进而影响引力波探测任务的完成.因此,必须对检验质量表面上的电荷进行控制,即开展电荷管理.

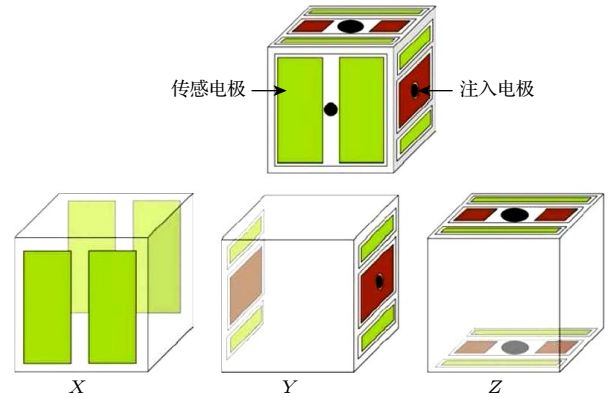


图 4 LISA 计划中惯性传感器敏感探头结构示意图^[7].传感电极以绿色显示,注入电极以红色显示.它们对检验质量施加 5.4 V, 100 kHz 的交流偏置,以便在检验质量上产生 0.61 V 的交流电位.同时,通过在传感电极上施加不同的直流电压组合,就可以驱动检验质量在内部自由浮动,且在 x 轴上执行干涉测量

Fig. 4. Diagram of the inertial sensor sensitive probe structure in the LISA mission^[7]. The sensing electrodes are shown in green, and the injection electrodes are shown in red. They apply a 5.4 V, 100 kHz AC bias to the test mass, resulting in a 0.61 V AC potential on the test mass. Additionally, by applying different combinations of DC voltages to the sensing electrodes, the test mass can be driven to float freely inside and perform interferometry along the x -axis.

目前,电荷管理主要有两种方案:金丝放电和紫外放电.金丝放电,即将一根导电金丝与检验质量相连,保持检验质量的等电位状态,从而消除电荷引入的噪声,这一方法已在重力恢复与气候试验

卫星 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)^[16], 重力场与稳态洋流探测器 (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, GOCE)^[17] 和重力恢复与气候试验后续卫星 (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow On, GRACE FO)^[18] 等卫星中得到了成功应用. 紫外放电, 即基于光电效应使用紫外线放电技术进行电荷管理, 由光电效应原理可知, 当照射到金属表面的光子能量大于金属的逸出功时, 金属中的电子会逸出金属表面, 从而进行电荷管理. 典型的代表有欧洲的引力探测器 B (Gravity Probe B, GP-B) 团队实现了陀螺仪表面的电荷控制^[19], Armano 等^[20,21] 设计了基于汞灯的电荷管理系统, 已在 LPF 计划中实际使用.

金丝放电原理简单且易于实现, 如图 5 所示, 在 GRACE FO 计划中应用导电金丝直接接触检验质量, 来保持检验质量与极板之间的等电位状态, 这种方式虽然简单, 但金丝的机械热噪声会干扰实际探测, 基于金丝放电的电荷管理方案不能满足空间引力波探测 $10^{-15} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ 的需求^[18].

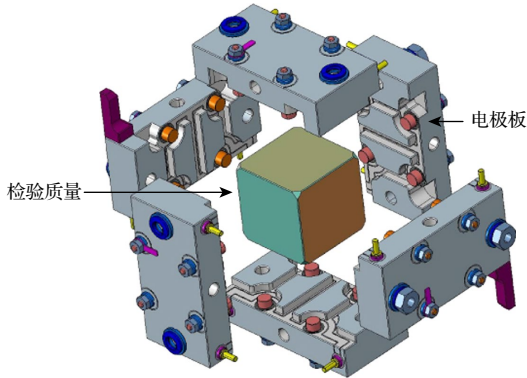


图 5 GRACE FO 中加速度计的机械核心, 由 18 g 的超低膨胀材料立方检验质量组成, 周围环绕着 3 对类似的电极板, 每对电极板控制两个自由度^[18]
Fig. 5. Mechanical core of the accelerometer in GRACE FO, consisting of an 18 g cubic test mass made of ultra-low expansion material, surrounded by three pairs of similar electrode plates, each pair controlling two degrees of freedom^[18].

目前的主流方案是选择无接触的紫外放电来进行电荷管理, 该方案不仅不会引入额外的机械热噪声, 还可以通过调节紫外光照射的方向和功率来控制电子的流向和密度. 目前检验质量和电极的常用材料为金, 其逸出功为 5.2 eV, 对应波长 238.92 nm 的光子能量. 但当金长期暴露于空气中

后, 在水和碳氢氧化物的作用下会使其逸出功降低至 4.2 eV 以下^[22], 此时使用较高波长的紫外光源即可完成电荷管理的需求, 但即便如此光源的波长仍需要至少小于 259.8 nm. 同时, 考虑到紫外光源引起的热量和电磁辐射会对检验质量产生干扰, 紫外光相对于检验质量的入射方向和角度也会对放电速率产生影响, 因此需要将紫外光源远离检验质量表面, 使用光纤来传输紫外光, 进而完成电荷管理. 如图 6 所示, 通过紫外光纤将传输的紫外光照射在与检验质量相对的电容极板或极板框架上, 使光电子流入检验质量; 或者照射检验质量, 将其表面的多余的光电子转移到电容极板或者极板框架上, 以此来控制检验质量的电荷^[23].

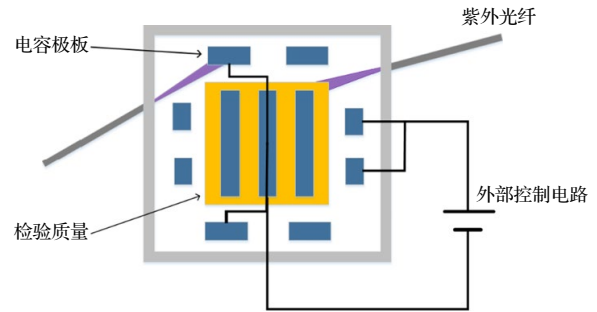


图 6 电荷管理示意图, 通过光纤引导紫外光照射检验质量表面^[23]
Fig. 6. Schematic diagram of charge management, where ultraviolet light is guided by optical fiber to irradiate the surface of the test mass^[23].

Luo 等^[10] 对天琴计划的灵敏度进行了分析, 通过多重论证对各个子系统的加速度噪声进行了分配, 给出天琴惯性传感器中的检验质量净余电荷控制需求为 $10^6 e$ (e 表示电荷, 电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), 等效净余电势控制需求为 10 mV, 此时其贡献的加速度噪声在 6 mHz 处小于 $2 \times 10^{-16} \text{ m}/(\text{s}^2 \cdot \sqrt{\text{Hz}})$, 满足天琴计划的需求.

3 电荷管理中的紫外光源

3.1 汞灯在电荷管理中的应用

汞灯是一种利用汞蒸气放电产生辐射的光源, 在电荷管理系统中使用的汞灯为低压汞灯, 工作原理基于低气压下汞原子被电子激发产生紫外线的机制. 其典型结构如图 7 所示, 在石英套管中充入适量汞, 当电流通过灯管时, 高能电子会激发汞蒸气中的汞原子, 使其最外层电子由基态跃迁到高能

级, 当这些电子返回到低能级时, 会释放出特定波长的紫外光^[24]. 通过这种方式, 低压汞灯能够将电能转换为光能, 谱线的峰值波长为 253.7 nm, 光子能量 4.89 eV, 满足电荷管理的需要.

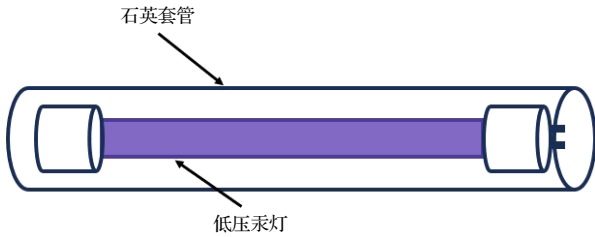


图 7 低压汞灯结构示意图

Fig. 7. Schematic diagram of the low-pressure mercury lamp structure.

1995 年, Buchman 等^[19]通过陀螺仪电荷测量法进行 GP-B 空间引力实验, 并使用了 Resonance LTD 设计的高效率汞灯与光纤耦合而产生光电流, 装置如图 8(a) 所示, 是基于光电效应电荷管理系统的原型^[19]. 利用该装置成功将陀螺仪表面的电荷控制在 15 mV 以内, 进行电荷控制的实验包括以下步骤: 首先点亮紫外光源, 然后将电荷控制电极的偏置设置为 18 V, 在系统达到平衡状态后将偏置改为 -18 V, 再次达到平衡后将偏置设置为 0 V. 上述阶段中陀螺仪电势与时间的关系如图 8(b) 所示^[19]. 在这些阶段中, 陀螺仪上的静态电荷都跟随电荷控制电极的偏置变化. 从 +18 到 -18 V 的转换过程中的放电曲线斜率表明光电流约为 0.2 pA, 这与对未悬浮陀螺仪的直流测量结果一致. 该实验初步证明了汞灯在电荷管理系统中作为光源的可行性.

随后, 为了证明汞灯的精度和可靠性, Buchman 等^[25]对陀螺仪进行了长时间的运行. 约 10 μ W 的 254 nm 的紫外光耦合进直径 300 μ m 的光纤中, 为了冗余, GP-B 搭载了两个汞灯, 每个灯有两根光纤, 可以照射每个陀螺仪上的两个紫外线装置. 通往 4 个陀螺仪的 8 根光纤中的每一根都有一个紫外线兼容开关, 从而允许在两种灯中选择一种进行照明. 电荷控制系统的地面测试是在陀螺仪不悬浮的情况下进行的, 光电流通过与陀螺仪所在外壳接地面的连接进行测量. 超过 10^5 h 的陀螺仪测试表明, 利用紫外光电效应产生电子进行电荷管理满足 GP-B 的要求, 是解决 GP-B 陀螺仪充电问题的方法.

2005 年, Conklin 等^[26]在 GP-B 中使用汞灯和光纤来控制陀螺仪的转子电荷, 陀螺仪外形如图 9(a) 所示, 是一个由熔融石英制成的圆柱体, 内部有一个球形腔室, 外壳内部通过圆形切割轮廓划分出 3 对相互正交的电极^[26]. 一根光纤将来自汞灯的紫外光通过如图 9(b) 的夹具传输到陀螺仪中, 以控制转子的电荷^[25]. 与紫外光纤终端同心的直径为 2 mm 的电极可以施加 +3, 0 或 -3 V 的偏置, 以控制光电子的流动方向, 从而使转子充电或放电.

参考汞灯电荷管理系统在 GP-B 任务中的成功应用, Armano 等^[20,21]研发了基于汞灯的电荷管理系统用于 LPF 计划, 完成了在轨数据分析, 量化了该非接触放电系统的性能. 其中电荷管理系统包括 UV 灯单元 (ULU)、光纤束 (FOH) 和惯性传感器紫外套件 (ISUK). ULU 使用低压汞灯产生

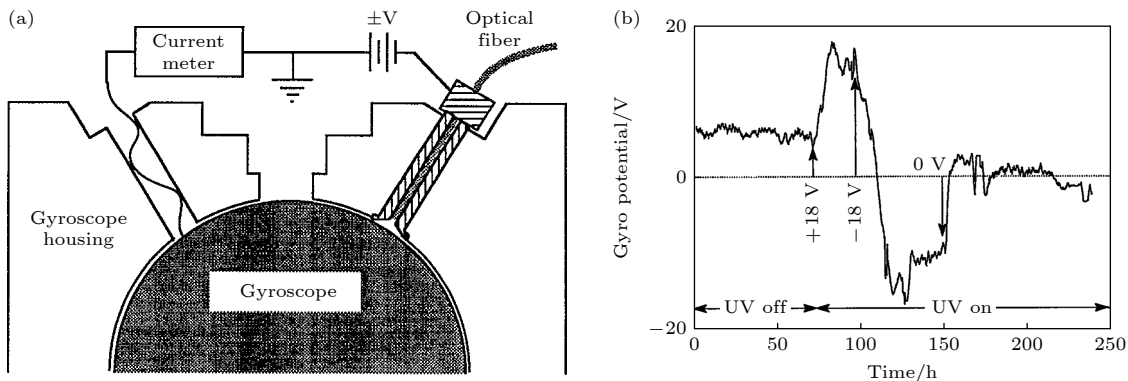


图 8 (a) 在陀螺仪中测量紫外线产生电流的装置图; (b) 采用 254 nm 紫外光对运转陀螺仪进行电荷控制, 施加 +18, -18 和 0 V 的偏置电压^[19]

Fig. 8. (a) Diagram of the device for measuring the current generated by ultraviolet light in a gyroscope; (b) charge control of the operating gyroscope using 254 nm ultraviolet light, applying bias voltages of +18 V, -18 V, and 0 V^[19].

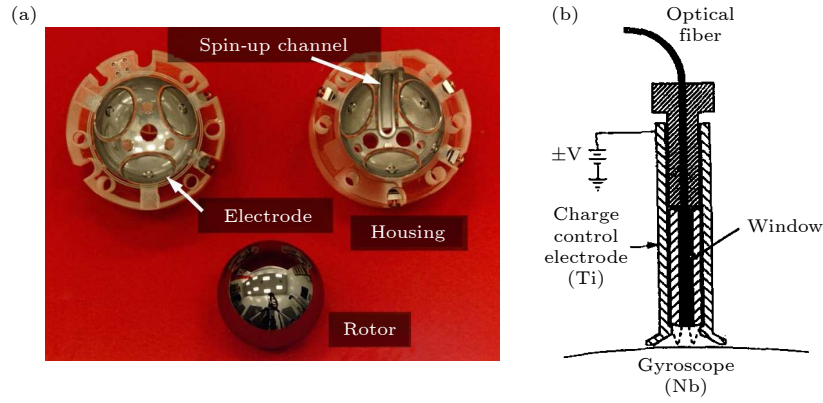


图 9 (a) 陀螺仪外形^[26]; (b) 紫外电荷管理光源夹具, 该夹具将紫外光引导到其内表面和陀螺仪上^[25]

Fig. 9. (a) Shape of the gyroscope^[26]; (b) ultraviolet charge management light source fixture, which directs ultraviolet light to its inner surface and the gyroscope^[25].

253.7 nm 的紫外光, 通过定制的透明光纤组件将紫外光从 ULU 传输到真空封装内的引力参考传感器 (GRS). 如图 10 所示, ISUK 是一个钛制的超高真空导线, 将紫外光引入传感器^[20]. 汞灯采用脉宽调制技术驱动, 允许在输出 UV 中实现 300:1 的动态范围. 抗辐照性能也是需要考虑的重要因素, 因为汞灯作为光源时, 需使用光纤束而不是单根光纤, 而光纤束对辐射损伤更为敏感^[27].

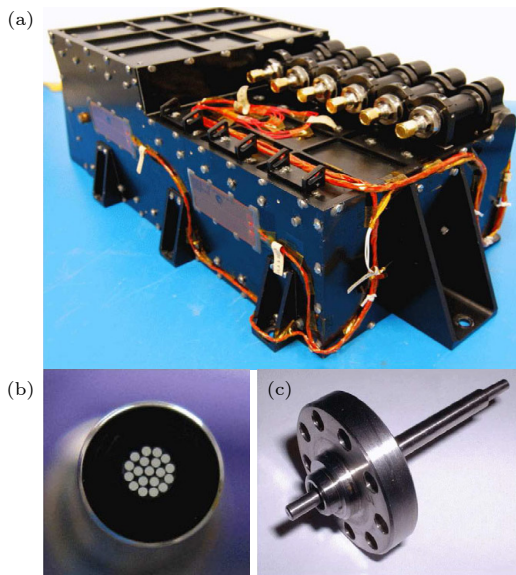


图 10 LPF 电荷管理系统^[20] (a) 紫外灯系统; (b) 光纤系统; (c) 馈通连接器

Fig. 10. LPF charge management system^[20]: (a) Ultraviolet lamp system; (b) optical fiber system; (c) feedthrough connector.

虽然已有如 GP-B 和 LPF 的太空任务选择使用光功率高的汞灯作为电荷管理系统的紫外光源, 但汞灯却往往具有开启响应慢、温度敏感度高、使

用寿命有限、整体功耗大和光耦合效率低等问题, 这些问题导致它们的光输出效率很低, 同时也会造成射频和电磁干扰. 因此, 寻找一种新的光源来替代汞灯是有必要的.

3.2 UV LED 在电荷管理中的应用

随着半导体技术和 GaN 外延技术的发展, UV LED 逐渐成为各大领域的研究热点, 在杀菌、消毒、光疗、传感、光通信、航空航天等方面得到了广泛应用. 与汞灯不同, LED 的发光基于半导体材料的电致发光效应^[28], 通过在 IV 族元素中掺杂 III 族或 V 族元素, 可以分别得到 p 型或 n 型材料, 能带图如图 11(a) 所示^[29]. 而如果在在一个半导体的两侧分别进行掺杂, 则可以在接触面上形成一个 pn 结, 如图 11(b) 所示^[29]. 当给 LED 的 pn 结正向电压时, 外电场方向与耗尽层中的内建电场方向相反, 从而削弱内建电场作用, 实现 LED 导通, 导带电子与价带空穴进行辐射复合, 释放的能量以光子

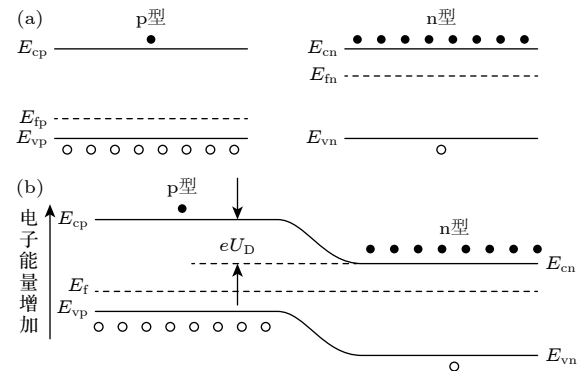


图 11 (a) p 型、n 型材料能带图; (b) pn 结能带图^[29]

Fig. 11. (a) Energy band diagrams for p-type and n-type materials; (b) energy band diagram of a pn junction^[29].

形式逸散, 表现为 LED 发光. 发光波长一般取决于外延材料的能带结构, AlGaIn 是目前最为常见的有源层材料, 通过改变 Al 组分占比, 可以对禁带宽度实现 3.4—6.2 eV 的连续可调, 进而实现 365—210 nm 光谱范围内的紫外发光. 同时材料本身具有的高热导率、低介电常数、高击穿电场、耐高温和抗辐照等优异特性, 让 UV LED 能够满足引力波探测中电荷管理系统的需求. 相较于汞灯, UV LED 的功耗更小、重量更轻、效率更高, 有更广泛的光谱选择、更高的动态范围和更长的工作寿命, 已经被认为是电荷管理系统中更具优势的紫外光源^[30].

为了验证 UV LED 作为电荷管理系统光源的可行性与优越性, Sun 等^[31]将 UV LED 作为紫外光源用于 LISA GRS 电荷管理, 并进行了一系列性能测试. 研究人员使用 TO-CAN 封装的 UV LED, 中心波长为 257.2 nm, 光功率约为 120 μW , 通过

光纤实现紫外光输出, 从光纤输出端发射出的功率约为 16 μW , 已经远超过当时 GRS 要求的 0.3 μW . 在实际驱动测试中, UV LED 的功耗小于 1 W, 而汞灯的功耗需要 12—15 W, 更低的功耗一方面带来更低的热效应, 使得 LISA 任务过程中要求的 10^{-6} K 热稳定管理更容易实现, 同时让功率的分配可以更多用于其他方面. 例如, 在设计允许的前提下, 理论上节省的功率可以将激光功率从 1 W 增至 2 W, 这将使 LISA 检测的灵敏度提高 41%, 检测量和事件率提高 283%. 更小的体积、更轻的重量、更快的响应和更灵活的调制方式等让测试中的 UV LED 表现出了远超传统汞灯的性能.

交流充电管理的结果如图 12 所示, 在情况 1 中, 当交流电偏置处于周期的负半段时, UV LED 被打开^[31]. 在短时间内产生的电子经历负偏置, 被排斥到检验质量, 使得检验质量上的电荷由正变负. 在情况 2 中, 紫外光的相位偏移了 180° , 导致

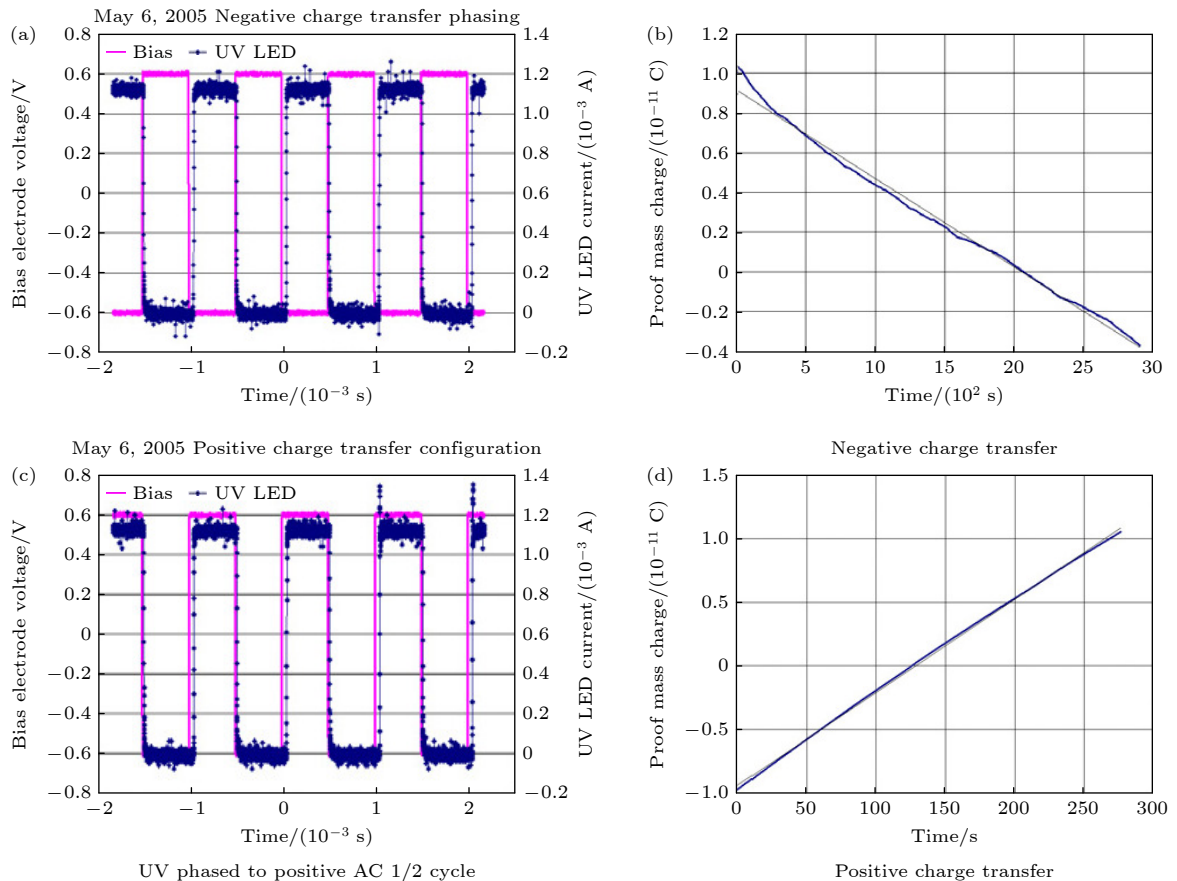


图 12 交流充电管理实验^[31] (a), (c) 左边的数字说明了用于控制负电荷和正电荷转移的相位控制, 图中噪声较强的迹线和噪声较小的迹线分别是 UV LED 和电极的驱动信号; (b), (d) 电荷转移的方向

Fig. 12. AC charge management experiment^[31]: (a), (c) Numbers on the left indicate the phase control used for managing negative and positive charge transfer, the traces with stronger and weaker noise correspond to the driving signals of the UV LED and the electrodes, respectively; (b), (d) illustrate the direction of charge transfer.

电子被吸引远离检验质量,从而使总电荷由负变正. 该技术的成功验证直接实现了电荷管理的两个进步. 首先,任何电荷转移偏置现在都可以应用在远离人们感兴趣频段的频率上. 其次,当交流调制电场的幅度约为 1 V 时,能够使检验质量的电荷转移表现为一个简单且良好的积分系统,而不是在低电压或未施加电压时观察到的长时间 RC 指数衰减. 此外,工作在较高频率的交流电荷转移技术更是允许系统在引力波信号波段外进行电荷管理,从而减少对 LISA 科学测量的干扰.

Pollack 等^[32]开发了一个扭秤实验装置,并利用 UV LED 成功实现了对扭摆电荷的精确控制,包括有效充电和放电,展示了 UV LED 在减少由电荷积累引起的力噪声方面的潜力. 实验装置图如图 13(a) 所示,该装置由一个可移动的金涂层铜板和一个悬挂在非导电石英纤维上的金涂层扭摆组成^[32]. 由发光波长为 244 nm 的 UV LED 照射扭摆表面激发出光电子实现放电,同时由 UV LED 驱动的电子枪将光电子导向扭摆表面实现充电. 研究发现 UV LED 能够以高达 2×10^5 e/s 的充电率对扭摆进行充电,此外,在放电过程中,扭矩噪声没有增加,白噪声水平相当于 3×10^5 e/ $\sqrt{\text{Hz}}$,满足 LISA 的要求,有助于提高探测器的灵敏度和性能.

除了器件性能是否满足系统需求,在实际使用过程中的可靠性也是需要重点关注的指标,尤其对于空间引力波探测相关工作,大部分的时间里光源都会受到包括高能粒子辐照、温度变化、物理振动等因素影响. 为了验证 UV LED 的长期可靠性与抗辐照性能, Sun 等^[33]在不同环境下对 UV LED 进行了长期测试. UV LED 以 10% 占空比 1 kHz 频率 2 mA 大小的脉冲电流驱动,可靠性测试结果如图 14 所示,在氮气环境中运行超过 19000 h,以及在小于 10^{-7} torr 的真空中运行超过 8000 h 后,UV LED 的光输出依旧稳定,变动值在初始值的 3% 以内,在氮气环境中运行超过 10500 h 后,中心波长偏移在 2 nm 以内^[33].

进一步,为了确定 UV LED 的抗辐照性能,研究人员使用加州大学戴维斯分校的 Crocker 回旋加速器进行了质子辐射测试,具体实验装置如图 15 所示^[33]. 两个发射波长为 255 nm 的 UV LED 被放置在质子束线的路径上,质子束由回旋加速器产生. 为了监测 UV LED 的光输出并减少辐射引起的干扰,使用具有较高抗辐照性能的 SiC 材料的光

电二极管作为探测器,并将 LED 斜向放置,从而允许 UV 探测器置于主质子束之外以减少辐射影响. 实验中,UV LED 在 20 kHz 的调制电流下工作,并暴露于 63 MeV 的质子辐射下,模拟了太空飞行中的工作条件和环境条件. 辐照总通量为 2×10^{12} 质子/ cm^2 ,相当于在 LISA 轨道上辐照 100 年的辐射剂量^[33]. 结果如图 16 所示,经过高通量质子辐射后,UV LED 的光输出和光谱没有显著变化^[33],这些测试结果为后续太空任务中 UV LED 的可靠性提供了科学依据.

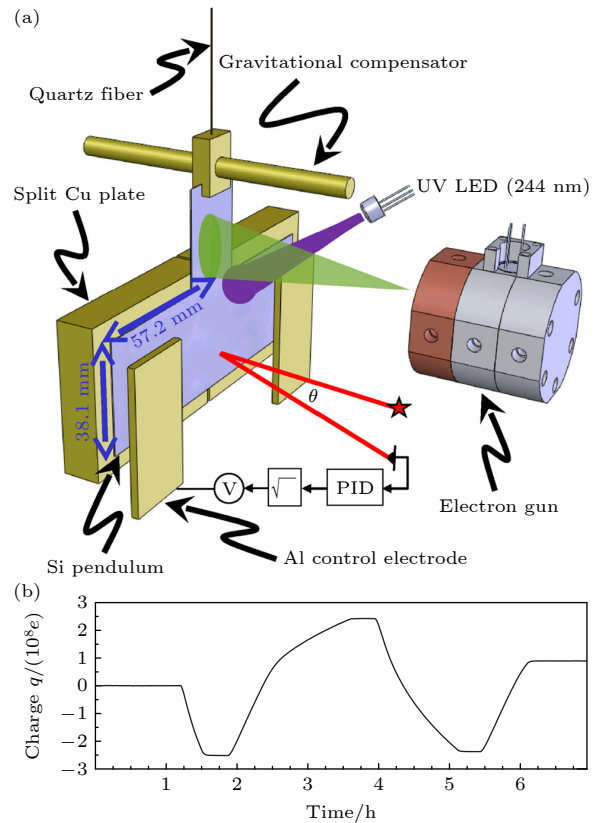


图 13 (a) 扭秤实验装置示意图, 装置由一个悬挂的矩形金涂层硅摆板、一个略大的可移动金涂层铜板和一个金涂层的铝控制电极组成, 通过自动准直仪光学测量摆板的扭转位移, 并利用 PID 回路控制电极上的电压, 以维持摆板的固定角度, 此外, 图中标出了用于从摆板移除和添加电子的 UV LED 和电子枪. (b) 摆板充放电实验结果示意图^[32]

Fig. 13. (a) Schematic diagram of the torsion balance experimental setup. The setup consists of a suspended rectangular gold-coated silicon vane, a slightly larger movable gold-coated copper plate, and a gold-coated aluminum control electrode. The vane's torsional displacement is measured optically using an auto-collimator, and the voltage on the electrode is controlled via a PID loop to maintain the vane at a fixed angle. Additionally, the UV LED and electron gun used for removing and adding electrons to the vane are indicated in the figure. (b) Schematic diagram of the vane charging and discharging experiment results^[32].

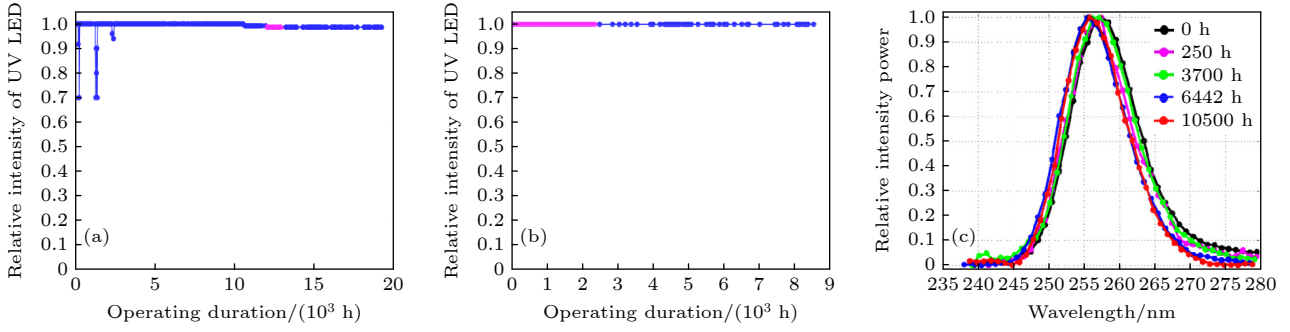


图 14 (a) UV LED 在氮气中的工作寿命测试达到 19000 h 以上; (b) UV LED 在真空中的工作寿命测试达到 8000 h 以上; (c) UV LED 在氮气中运行 10500 h 后中心波长偏移在 2 nm 以内^[33]

Fig. 14. (a) UV LED operational lifetime test in nitrogen reaching over 19000 hours; (b) UV LED operational lifetime test in vacuum reaching over 8000 hours; (c) the center wavelength shift of the UV LED after operating for 10500 hours in nitrogen is within 2 nm^[33].

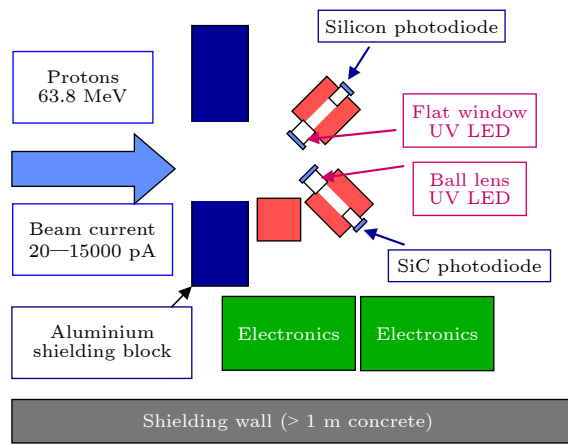


图 15 质子辐射下 UV LED 测试的实验装置布局 (俯视图), 回旋加速器输出质子束, 两个 255 nm 波长的 UV LED 被安置于质子束流的路径中, 模拟太空飞行条件, 并实时监测其光输出^[33]

Fig. 15. Experimental setup layout for UV LED testing under proton radiation (top view). A cyclotron accelerates and outputs a proton beam, with two UV LEDs emitting at 255 nm placed in the path of the proton beam to simulate spaceflight conditions, and their light output is monitored in real-time^[33].

对于 UV LED 使用过程中可能受到的温度影响与振动影响, Balakrishnan 等^[30] 测试了 UV LED 在热循环和振动作用下的性能稳定性, 测试结果见图 17. 在经过 27 次热真空循环和 9 min 的均方根为 14.07 g 的振动后, 器件电流变化小于 3%, 光功率变化小于 15%, 谱峰和半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 没有明显变化. 研究人员同时展示了多种碳化物薄膜图层情况下 UV LED 的光激发情况, 证明了 UV LED 作为紫外光源的高动态范围和稳定功率输出. 在图 18 所示的实验中, 单个 LED 以 100 Hz 的频率调制, 占空比为 50%, 驱动功率为 6.4 mA, 产生 10 μ W 的光功率

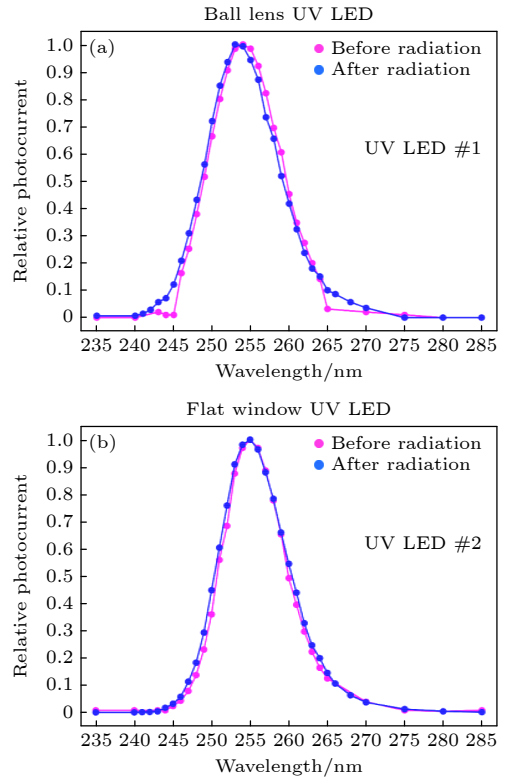


图 16 质子辐照前后 UV LED 发射光谱测量, 影响度为 2×10^{12} 质子/ cm^2 , 中心波长 255 nm, 无偏移^[33]

Fig. 16. UV LED emission spectra measurements before and after proton irradiation, with a dose of 2×10^{12} protons/ cm^2 , the center wavelength is 255 nm, with no shift^[33].

输出, 偏置也被调制为 100 Hz, 3.0 V_{pp}, 通过改变偏置电压的相位对检验质量进行电荷管理^[30]. 同时, 检验质量电位变化的速率可以通过降低 LED 光功率或降低 LED 接通期间的占空比来减小.

Hollington 等^[34] 则进一步针对短波长 UV LED (实验中使用的两种 UV LED 峰值波长仅为 240 nm 与 250 nm) 进行了一系列寿命测试, 包括持续 50 天的 DC 快速放电测试、持续 21 天的温度

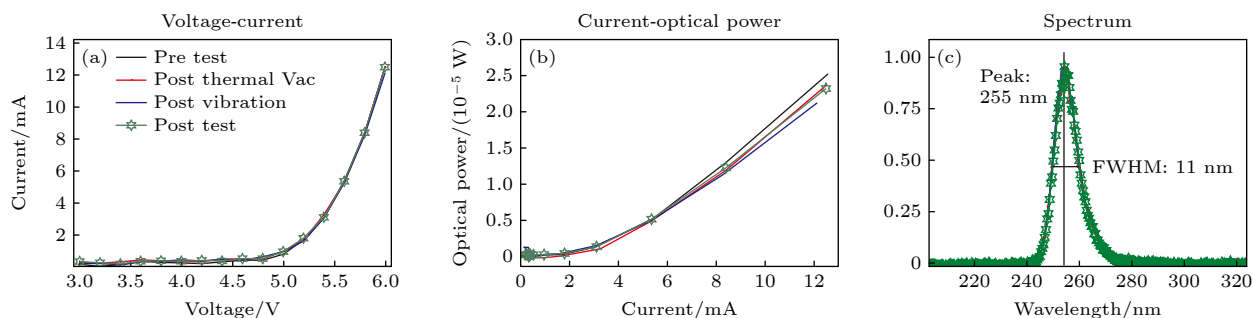


图 17 UV LED 测试前、热真空循环后、振动后、热循环后 (测试后) 的数据采集^[30] (a) 电流随电压变化情况; (b) 光功率随电流变化情况; (c) 光谱变化情况

Fig. 17. Data collected of the UV LED before testing, after thermal vacuum cycling, after vibration, and after thermal cycling (post-testing) are shown^[30]: (a) Current versus voltage; (b) optical power versus current; (c) and spectral changes.

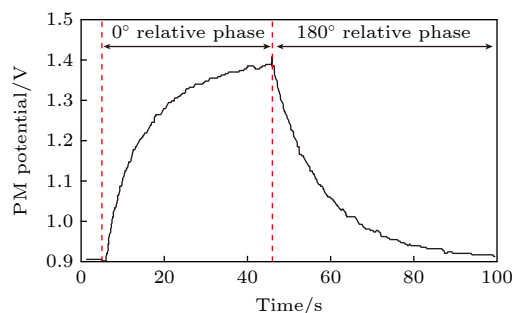


图 18 在交流电荷控制方式下使用浮动探针测量的检验质量电位, 电势是相对于固定在地面上的系统外壳来测量的, 入射紫外功率为 $10 \mu\text{W}$, 调制频率为 100 Hz, 占空比为 50%, 偏置为 3.0 Vpp, 对地的防护质量电容为 17 pF^[30]

Fig. 18. Test mass potential measured using a floating probe under AC charge control. The potential is measured relative to the system's ground-fixed enclosure. The incident UV power is $10 \mu\text{W}$. Modulation frequency is 100 Hz. Duty cycle is 50%, and bias is 3.0 Vpp. The guard mass capacitance to ground is 17 pF^[30].

依赖的脉冲快速放电测试和持续 507 天的脉冲连续放电测试. 测试所用的 UV LED 展示了相当于 25 年以上实际任务使用的寿命, 证明了短波长 UV LED 的可靠性可以胜任电荷管理任务.

同时, Hollington 等^[35]又选择了 3 种商用 UV LED, 对它们的输出功率、光谱稳定性、脉冲特性、温度依赖性、可靠性等进行了测试以评估它们的性能是否适用于太空作业. 3 种 UV LED 的中心波长分别为 255 nm, 250 nm, 240 nm, 更短的波长让紫外光具有更高的能量从纯金表面实现电子逸出, 这让研究人员甚至能够适当尝试通过烘烤等方式完全消除检验质量表面污染而不影响电子逸出 (如前面所提到的, 表面污染会降低表面逸出功), 这将使后续测试更加精确. 实际测试结果也表明, 相对于 LPF 的电荷管理系统中使用的汞灯, 3 种

UV LED 在几乎所有方面都能够展现出更加优越的性能, 即使在简单的直流驱动情况下, UV LED 也因更大的动态范围表现出更加优异的测试效果. 研究还表明, 3 种器件类型的脉冲都至少可以达到 100 kHz, 占空比为 50%, 这将允许它们与惯性传感器中存在的注入实现同步偏置, 进而降低不对称表面特性的风险, 增加测试的动态范围、提高放电效率. 不过这 3 种 UV LED 的光功率都表现出了明显的温度依赖特性, 在辐照测试结束后光功率也出现了接近甚至超过 10% 的下降, 在振动测试中也会出现不同程度的损坏, 这一系列测试验证了 UV LED 的优异特性的同时也对其发展提出了下一步要求.

在实际的电荷管理系统设计中, 鉴于 LPF 电荷管理系统的优良性能, LISA 所使用的电荷管理系统在很大程度上借鉴了 LPF 的设计, 包括电极外壳、检验质量表面、将紫外光从光源传输至检验质量表面的光纤、用于传感驱动所需的电子设备以及相关的软件系统等. 图 19 为 LISA 电荷管理系统功能框图, 其中包含两个紫外光单元, 每个单元用 12 个 UV LED 替代了 LPF 中的汞灯结构, 由光纤输送到重力传感器的 3 个注入端, 给 2 个检验质量提供紫外光照射^[36]. 更多的光源也意味着更多的冗余度, 12 个 LED 的使用让每一个入射端口都有了 2 倍的冗余. 此外, 通过高频脉宽调制, UV LED 可以与 100 kHz 的注入信号同步脉冲, 这意味着可以通过调整相位调控紫外光脉冲进而针对不同检验质量表面电荷情况实现电荷管理, 而不需要在检验质量或电极外壳上施加额外偏压, 这让 UV LED 能够拥有远超于汞灯的动态调节范围, 如图 20 所示^[36].

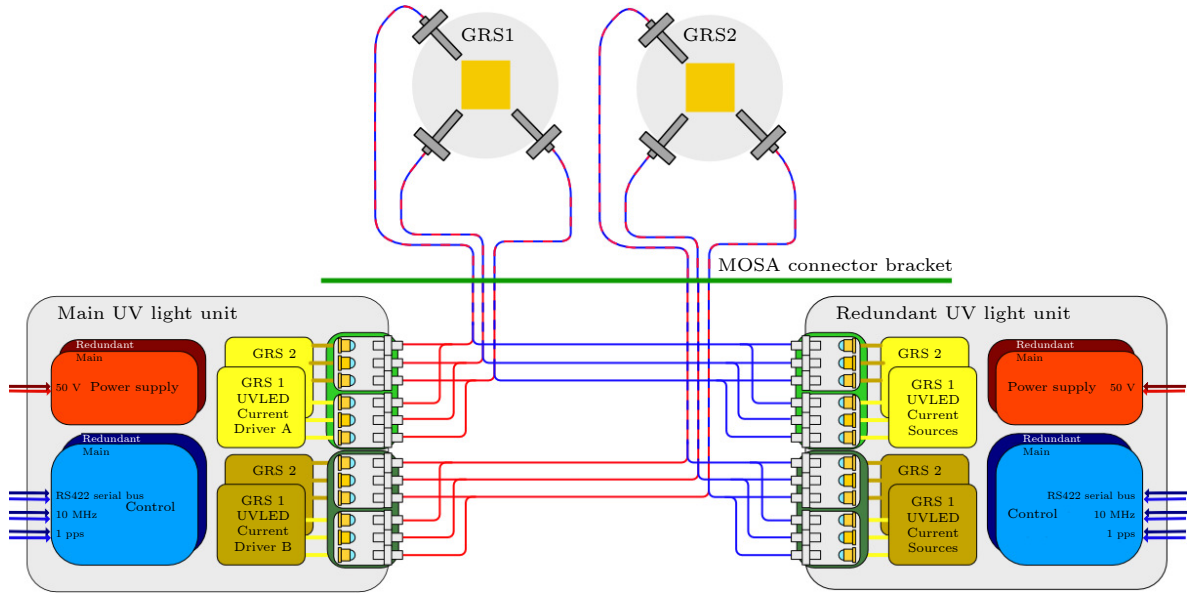


图 19 LISA 电荷管理系统功能框图, 包括两个 ULU, 其中一个作为冗余, 保证 GRS 中的检验质量电荷能得到有效管理, 每个 ULU 包括供能、控制、光输出模块, 各有 12 个 UV LED 为两个检验质量提供光源^[36]

Fig. 19. Functional block diagram of the LISA charge management system, including two ULUs, one of which serves as a redundancy to ensure effective charge management of the test masses in the GRS. Each ULU consists of power supply, control, and light output modules, with 12 UV LEDs providing light sources for the two test masses^[36].

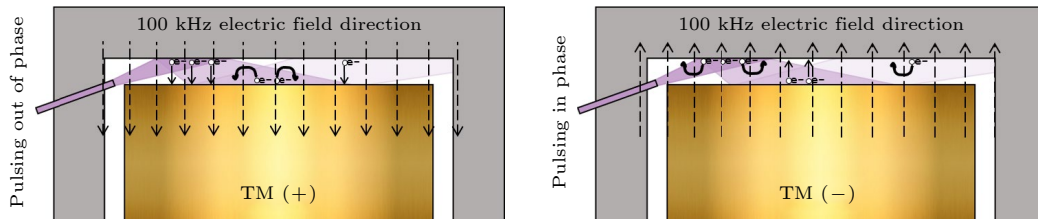


图 20 脉冲调制示意图, UV LED 与 GRS 中的 100 kHz 的注入信号同步脉冲, 通过调整 100 kHz 电场的方向调整紫外光的相位, 实现对检验质量电荷的调控^[36]

Fig. 20. Pulse modulation schematic, where the UV LED is synchronized with the 100 kHz injection signal in the GRS, by adjusting the direction of the 100 kHz electric field. The phase of the ultraviolet light is adjusted to regulate the charge on the test mass^[36].

因为同样的电荷积累问题, 由 Pi 等^[37]提出的天琴计划也使用了波长约为 250 nm 的 UV LED 作为光源用于电荷管理. UV LED 由可变直流电源控制, 光源的光经过透镜耦合后通过直径 600 μm 的光纤传输至检验质量和外壳表面. 值得注意的是, 天琴系统中检验质量的放电/充电过程是通过两束紫外光线照射到检验质量/外壳结构上来实现的, 一束照射检验质量, 另一束照射外壳表面, 通过控制检验质量和外壳表面的电子逸出实现电荷管理.

目前世界上成功的在轨应用有 GP-B 和 LPF 计划, 它们使用的电荷管理系统的紫外光源均为汞灯, 虽然在轨实际表现均能满足各项实验指标, 但由于汞灯启动时间较慢, 光功率不稳定, 并且基于

汞灯的电荷管理系统体型和功耗都较大, 这不利于长时间的在轨工作. 而现在, 随着半导体技术的发展, UV LED 的优势远超汞灯, 将作为 LISA 计划中电荷管理系统的紫外光源. 有关汞灯和 UV LED 的电荷管理系统中典型代表的充放电速率和测量精度总结, 如图 21 所示. 可以看出, 基于 UV LED 的电荷管理系统具有更快的充放电速率, 这对于面对太空中的复杂环境有了更加灵敏的应对能力, 结合上述诸如 Sun 等^[31,33]、Pollack 等^[32]和 Hollington 等^[34,35]团队的研究成果, 可以预见目前 UV LED 是替代汞灯成为大部分电荷管理系统光源的更优解.

不过, UV LED 也有着不可忽视的缺点. 除了前文提到明显的温度依赖特性以及在振动下出现不同程度损坏以外. 有研究表明, 峰值波长为 251 nm,

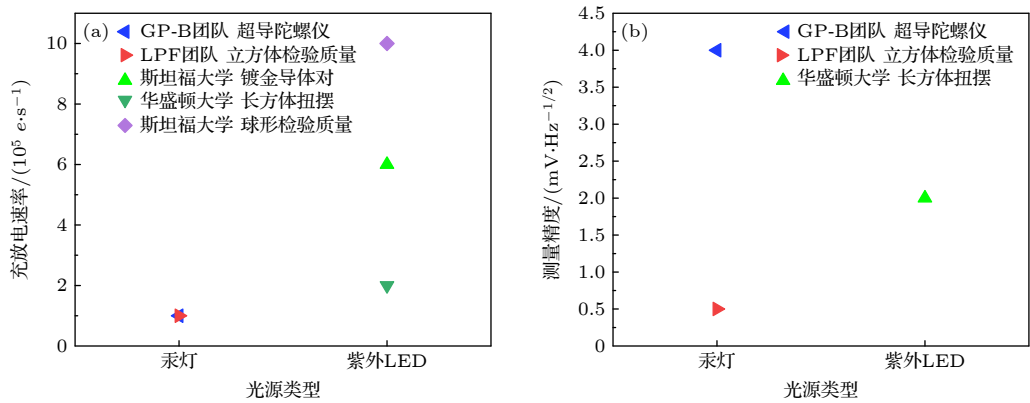


图 21 不同电荷管理系统的充放电速率和测量精度 [19,20,31–33]

Fig. 21. Charging and discharging rates and measurement accuracy of different charge management systems [19,20,31–33].

表 1 不同团队有关汞灯、UV LED 研究内容对比

Table 1. Comparison of mercury lamps and UV LED research content among different teams.

研究团队	光源类型	研究内容
Buchman等[19]	汞灯	将陀螺仪表面的电荷控制在15 mV以内, 初步证明了汞灯在电荷管理系统中作为光源的可行性
Buchman等[25]	汞灯	长时间的运行证明了汞灯的精度和可靠性
Conklin等[26]	汞灯	进行了控制陀螺仪转子的充放电实验
Armano等[20,21]	汞灯	研发了基于汞灯的电荷管理系统用于LPF任务
Sun等[31,33]	UV LED	验证了UV LED用于电荷管理系统的可行性与优越性; 对UV LED进行了老化测试与抗辐照测试
Pollack等[32]	UV LED	成功实现了对扭摆上电荷的充放电控制
Balakrishnan等[30]	UV LED	对UV LED进行了热循环和振动作用下的稳定性测试
Hollington等[34,35]	UV LED	对更短波长的UV LED进行了老化测试; 对3种商用UV LED进行了一系列测试以评估是否可用于太空任务

FWHM 约为 10 nm 的 UV LED 在脉冲模式下, 虽然能以 6% 的占空比产生 200 pW 的光功率来满足电荷管理中光功率调控要求 [38], 然而为了满足 10 pW 的最小光功率要求, 需要进一步减小占空比, 精确控制从而变得困难, 这可能会限制其进一步应用. 此外, 用于电荷管理系统的光源应具有高带宽以满足高频工作的需要, 同时还应具有良好的稳定性以满足长期在空间工作的需要, 因此追求性能更好的紫外光源是未来电荷管理需要关注的重点之一. 现将不同团队有关电荷管理系统紫外光源的研究内容进行总结, 在表 1 列出.

4 Micro-LED 在电荷管理中的应用

近年来, 第三代半导体技术 micro-LED 逐步进入人们的视野, 作为一种微米级 LED, micro-LED 的尺寸一般在 1—100 μm . 相关研究表明, 与大面积 LED 相比, 由于侧壁出光增强, micro-LED 具有许多优势性能特征, 如更好的电流扩展、更低的自

热效应、更高的调制带宽和更高的光功率密度 [39,40]. 同时, micro-LED 比普通 LED 具有更长的寿命, 能在较高的电流密度下稳定工作 [41]. 并且小尺寸的 micro-LED 具有更高的光提取效率 (LEE) 和内量子效率 (IQE), 从而具有更高的外量子效率 (EQE) [42], 因而能够具有更小的功耗, 也更容易在电荷管理系统中集成和应用.

常用的 UV micro-LED 结构如图 22(a) 所示 [43], 其外延层生长在蓝宝石衬底上, 主要包括 n 型层、量子阱 (multiple quantum well, MQW) 结构、p 型层. 其基本工艺为: 通过金属有机物化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 工艺在蓝宝石衬底上生长外延层, 包括 AlN 缓冲层、非故意掺杂的 AlGaIn 层、n 型的 AlGaIn 层、多量子阱层、电子阻挡层、p 型的 AlGaIn 层和 p 型的 GaN 层. 通过沉积纳米级别的 ITO 层作为电流扩散层, 并使用标准光刻、湿法蚀刻和等离子体蚀刻形成微米大小的 micro-LED

台阶, 利用快速热退火处理形成欧姆接触, 并沉积一层 SiO_2 层用于绝缘层同时在一定程度上减小漏电, 最后打孔并溅射金属 (图 22(a) 的 Ti/Au) 作为 p 和 n 电极. 图 22(b) 为封装后的芯片显微镜照片.

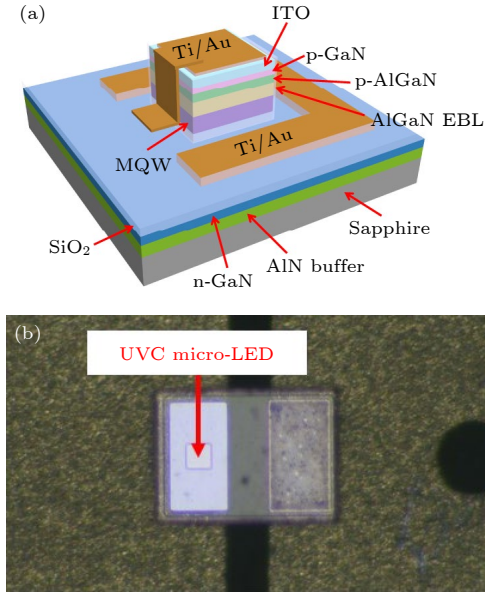


图 22 UV micro-LED (a) 结构示意图^[43]; (b) 显微镜照片
Fig. 22. UV micro-LED: (a) Schematic diagram of the structure^[43]; (b) microscopic photograph.

在紫外波段上的表现, UV micro-LED 比 UV LED 功耗更低, 光功率密度更高, 散热更好, 稳定性更高. 同时, micro-LED 还具有更小的动态电流调节范围, 这对于实现更精确的光输出功率控制至关重要, 可实现 nW 甚至 pW 级的光功率调节. Micro-LED 较小的尺寸可以与光纤实现高效率的耦合, 在实际使用中能以更低的电流进行驱动, 从而实现电荷管理系统中更长的使用寿命, 更小的功耗和更容易集成的系统, 并能更精确控制空间惯性传感器检验质量上的电荷.

随着 UV micro-LED 的制备水平的逐步成熟, micro-LED 已经初步在电荷管理系统中进行应用. 2018 年, He 等^[44] 首先研究了 UVC micro-LED 在紫外光通信中的应用, 使用的 262 nm UVC micro-LED 在 3.4 kA/cm^2 的电流密度下可达 $192 \mu\text{W}$ 的光功率. 2021 年, Yu 等^[45] 制备了 $20 \mu\text{m}$ 的 UV micro-LED, 发现其峰值 EQE 相较于 $300 \mu\text{m}$ 的 LED 提高了 20%, 且能承受更高的电流密度, 证明了小尺寸 UV micro-LED 具有更高的 EQE 与更强的电流扩展均匀性. 同年, Floyd 等^[46] 也发布了关于 UV micro-LED 的研究, 将 micro-LED 尺寸从 $90 \mu\text{m}$ 缩小到 $5 \mu\text{m}$, 使得 EQE 提高了 1.8 倍, 证明了 UV micro-LED 具有更高的 LEE. 2022 年, Qian 等^[42,47] 制备了 $8\text{--}200 \mu\text{m}$ 的 UV micro-LED, 发现小尺寸的 micro-LED 具有更高的 EQE, 同时结合 FDTD 仿真证实了 UV micro-LED 的光提取效率具有明显优势, 并对 UV micro-LED 的性能增强技术及应用进行了综述^[48]. 2024 年, Gu 等^[49] 又制备了尺寸 $100 \mu\text{m}$ 波长 253 nm 的 UV micro-LED, EQE 达到 3.55%. 同时, 还制作了基于 micro-LED 与光纤的耦合模块, 使用两块非球面透镜的耦合系统, 在较低的电流驱动下可以满足电荷管理系统对于光纤出射端 $3 \mu\text{W}$ 的光功率输出要求^[50]. 利用该器件和该耦合模块, Ruan 等^[51] 成功进行了基于 UV micro-LED 电荷管理的初步应用. 对于检验质量初始电压为 -5 V 和 $+5 \text{ V}$ 的两种情况, 在不同电流驱动下电荷管理效果如图 23 所示, 较低的驱动电流可以让系统在低功耗下运行, 有助于长时间的太空飞行任务.

有关深紫外 micro-LED 抗辐照、温度特性也有被研究, 对于 260 nm 的 micro-LED, 其 $I\text{-}V$ 特

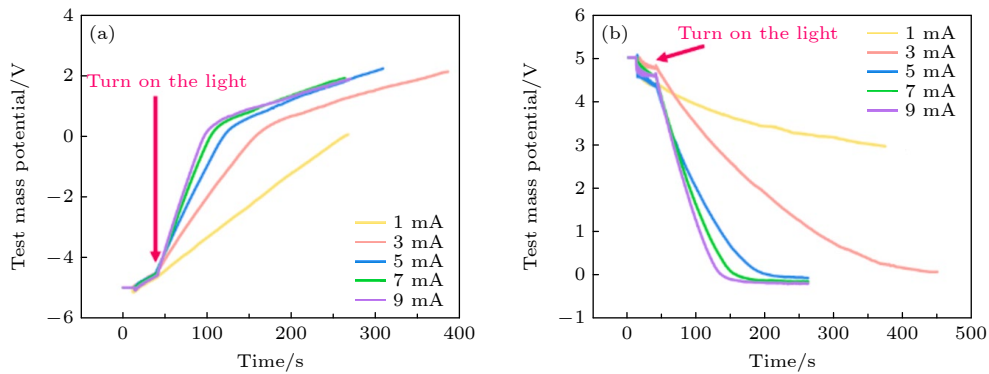


图 23 (a) 初始电压 -5 V 电荷管理效果图; (b) 初始电压 $+5 \text{ V}$ 电荷管理效果图^[51]

Fig. 23. (a) Charge management effect with initial voltage of -5 V ; (b) charge management effect with initial voltage of $+5 \text{ V}$ ^[51].

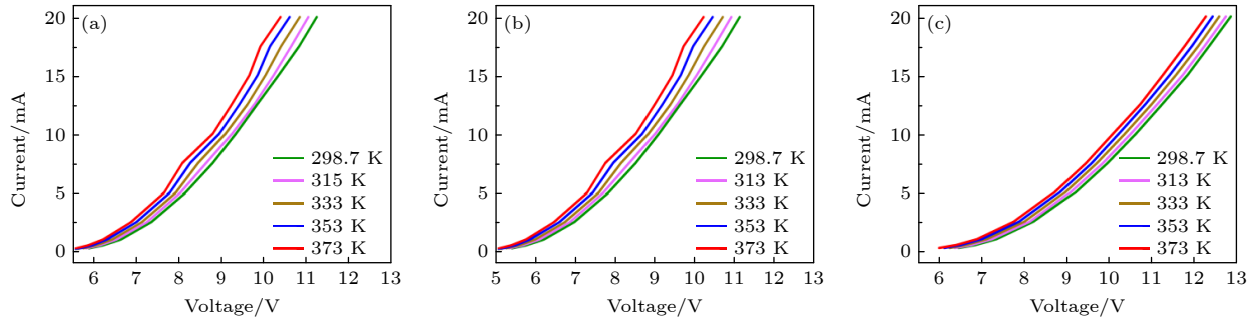


图 24 Micro-LED 在不同温度下的 I - V 曲线^[52] (a) 新 micro-LED; (b) 1×10^9 ions/cm² 剂量钽辐照; (c) 5×10^9 ions/cm² 剂量钽辐照
Fig. 24. I - V curves of micro-LED under different temperatures^[52]: (a) The fresh micro-LED; (b) Ta ion irradiation with fluences of 1×10^9 ions/cm²; (c) Ta ion irradiation with fluences of 5×10^9 ions/cm².

表 2 用于电荷管理系统 (CMS) 的紫外光源对比

Table 2. Comparison of ultraviolet light sources for the charge management system (CMS).

参数名称	紫外汞灯 ^[31]	UV LED ^[53,54]	UV micro-LED ^[49,51]
电源功耗/W	15	1	$\sim 3 \times 10^{-3}$
电磁干扰	大	小	小
质量/kg	3.5	0.3	0.1
电荷管理系统尺寸	17 cm $\times$ 13 cm $\times$ 17 cm	10 cm $\times$ 8 cm $\times$ 3 cm	7 cm $\times$ 5 cm $\times$ 4 cm
出射的紫外光功率/ μ W	~ 120	~ 100	~ 105
光纤尾端出射的功率/ μ W	~ 11	~ 16	~ 16
中心波长/nm	194—254	257	253
快速调制能力	实现困难	通过对驱动电流进行调制	可直流、脉冲调制
电荷控制手段	只能使用DC	AC和DC	AC和DC
电荷控制频率	信号带宽内部	处于信号带宽之外	处于信号带宽之外
动态范围	100	10^5	10^6
电荷管理分辨率	低	高	更高
电荷控制速率	低	高	高

性曲线受温度 and 不同浓度 Ta 离子辐照的影响^[52], 如图 24 所示. 随着温度的升高, 同样电流下的电压越小, 光功率越低. 同时辐照浓度越高, 器件的电阻越大, 这种 I - V 特性的退化可能是由辐照影响下 GaN 膜电阻率升高引起的. 由于紫外 micro-LED 尺寸较小, 使得其发光功率较低, 虽然阵列化可以有效提高分辨率并解决这一情况, 但目前阵列化技术尚不成熟, 同时紫外 micro-LED 器件的均匀性也需要提高, 来满足电荷管理系统对紫外光源的要求. 并且, 相对于传统的 LED, 目前 micro-LED 的成本相对较高, 如何优化工艺降低成本, 促进 micro-LED 更好的应用, 是今后需要解决的问题.

基于上述对紫外光源的研究进展的总结, 将紫外汞灯、UV LED 与 UV micro-LED 的参数进行了对比^[31,49,51,53,54]. 从表 2 可以看出, 与 LED 相比, micro-LED 具有更低的功耗, 更轻的重量, 更精细的光功率调节以及更快的调制速度, 将会给未来电

荷管理系统的性能带来进一步的提升. 同时, 在紫外波段, micro-LED 也具有丰富的波长选择, 除了前文提到的 260 nm^[52] 和 275 nm^[45] 的 UV micro-LED, 还有 240 nm^[55], 255 nm^[56] 以及 280 nm^[57] 和 290 nm^[58] 等发光波长的 UV micro-LED. 这些都为 UV micro-LED 在电荷管理中的应用提供了更多的选择, 可以针对不同的场景提出更丰富的解决方案.

5 总 结

本文从基于光电效应的紫外放电技术入手, 主要围绕空间引力波探测任务中电荷管理系统使用的光源展开叙述, 介绍了历年来不同电荷管理系统的实施方式, 比较了不同紫外光源性能的优劣, 并且对未来紫外光源的选择提出了展望. 汞灯作为第一代应用于电荷管理的紫外光源, 在 GP-B, LPF

任务中取得了成功,但汞灯启动慢,通常需要半小时,功耗较大,还要配备额外的冷却系统,加大了整个系统的体积,并且汞灯难以实现快速调制,同时还有很大的电磁干扰,这一系列缺点限制了其进一步应用,目前已经逐步退出历史舞台. UV LED 凭借体积小、重量轻、功耗低等优点,成为了电荷管理系统中又一可选择的光源,国外一系列的工作证明了 UV LED 作为电荷管理系统中光源的可行性,使得 UV LED 将成为 LISA 计划中电荷管理系统的紫外光源. 但要想进一步提高电荷管理系统的动态精度,以及在轨运行的使用寿命,对光源的性能提出了新的要求,这为 UV micro-LED 的登场作出了铺垫. 已有课题组对 UV micro-LED 在电荷管理中的应用进行相关研究,设计的 UV micro-LED 发光检测阵列结合自反馈电路可以实现稳定、精确的光输出功率,以满足电荷管理系统的各种需求. 相信在不久的将来,带有 UV micro-LED 的电荷管理系统将进入太空,为引力波探测任务带来更高的精度.

参考文献

- [1] Cai R G, Cao Z K, Guo Z K, Wang S J, Yang T 2017 *Natl. Sci. Rev.* **4** 687
- [2] Fryer C L, New K C B 2011 *Living Rev. Relativ.* **14** 1
- [3] Collaboration T L S, Aasi J E A 2015 *Classical Quant. Grav.* **32** 074001
- [4] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, Acernese F, Ackley K, Adams C, Cao J 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 221101
- [5] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, Abernathy M R, Acernese F, Ackley K, Cerretani G 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 221101
- [6] Danzmann K, Rüdiger A 2003 *Classical Quant. Grav.* **20** S1
- [7] Hollington D 2011 *Ph. D. Dissertation* (London: Imperial College)
- [8] Pau Amaro-Seoane, Heather Audley, Stanislav Babak 2017 *arXiv: 1702.00786 [astro-ph. IM]*
- [9] Hu W R, Wu Y L 2017 *Natl. Sci. Rev.* **4** 685
- [10] Luo J, Chen L S, Duan H Z, Gong Y G, Hu S, Ji J, Zhou Z B 2016 *Classical Quant. Grav.* **33** 035010
- [11] Wang H T, Jiang Z, Sesana A, Barausse E, Huang S J, Wang Y F, Luo J 2019 *Phys. Rev. D* **100** 043003
- [12] Hu X C, Li X H, Wang Y, Feng W F, Zhou M Y, Hu Y M, Shao C G 2018 *Classical Quant. Grav.* **35** 095008
- [13] Armano M, Audley H, Baird J, Binetruy P, Born M, Bortoluzzi D, Zweifel P 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 061101
- [14] Araújo H M, Wass P, Shaul D, Rochester G, Sumner T J 2005 *Astropart. Phys.* **22** 451
- [15] Wass P J, Araújo H M, Shaul D N A, Sumner T J 2005 *Classical Quant. Grav.* **22** S311
- [16] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, Thompson P F, Watkins M M 2004 *Science* **305** 503
- [17] Muzi D, Allasio A 2004 *Acta Astronaut.* **54** 167
- [18] Christophe B, Boulanger D, Foulon B, Huynh P A, Lebat V, Liorzou F, Perrot E 2015 *Acta Astronaut.* **117** 1
- [19] Buchman S, Quinn T, Keiser G M, Gill D, Sumner T J 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 120
- [20] Armano M, Audley H, Baird J, Binetruy P, Born M, Bortoluzzi D (LISA Pathfinder Collaboration) 2018 *Phys. Rev. D* **98** 062001
- [21] Armano M, Audley H, Auger G, Baird J T, Binetruy P, Born M (LISA Pathfinder Collaboration) 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 171101
- [22] Schulte M O, Shaul D N A, Hollington D, Waschke S, Sumner T J, Wass P J, Nannarone S 2009 *Classical Quant. Grav.* **26** 094008
- [23] Yang Q F 2020 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [杨泉峰 2020 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [24] Kitsinelis S, Zissis G, Fokitis E 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 045209
- [25] Buchman S, Everitt C W F, Parkinson B, Turneure J P, Brumley R, Gill D, Xiao Y 2000 *Adv. Space Res.* **25** 1181
- [26] Conklin J W, for the Gravity Probe B Collaboration 2008 *J. Phys. Conf. Ser.* **140** 012001
- [27] Sumner T J, Shaul D N A, Schulte M O, Waschke S, Hollington D, Araújo H 2009 *Classical Quant. Grav.* **26** 094006
- [28] Ke X 2024 *Handbook of Optical Wireless Communication* pp1257–1306
- [29] Shockley W 1949 *Bell Syst. Tech. J* **28** 435
- [30] Balakrishnan K, Sun K X, Alfauwaz A, Aljadaan A, Almajeed M, Alrufaydah M, Zoellner A 2012 *arXiv: 1202.0585 [physics. ins-det]*
- [31] Sun K X, Allard B, Buchman S, Williams S, Byer R L 2006 *Classical Quant. Grav.* **23** S141
- [32] Pollack S E, Turner M D, Schlamminger S, Hagedorn C A, Gundlach J H 2010 *Phys. Rev. D* **81** 021101
- [33] Sun K X, Leindecker N, Higuchi S, Goebel J, Buchman S, Byer R L 2009 *J. Phys. Conf. Ser.* **154** 012028
- [34] Hollington D, Baird J T, Sumner T J, Wass P J 2017 *Classical Quant. Grav.* **34** 205009
- [35] Hollington D, Baird J T, Sumner T J, Wass P J 2015 *Classical Quant. Grav.* **32** 235020
- [36] Letson B C 2022 *Ph. D. Dissertation* (Florida: University of Florida)
- [37] Pi X H, Liu Q, Xu J H, Zhu L, Wang Q L, Zhang Y T, Yang S Q, Luo J 2023 *Classical Quant. Grav.* **40** 035005
- [38] Kenyon S P, Letson B, Clark M, Olatunde T, Ritten L, Schindler J, Sumner T J 2021 *IEEE Aerospace Conference* **50100** p1
- [39] Gong Z, Jin S R, Chen Y J, McKendry J, Massoubre D, Watson I, Dawson M D 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 013103
- [40] Tian P F, McKendry J J, Gong Z, Guilhabert B, Watson I M, Gu E, Dawson M D 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 23
- [41] Tian P F, Althumali A, Gu E D, Watson I M, Dawson M D, Liu R 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 045005
- [42] Qian Z Y, Zhu S J, Shan X Y, Yin P, Yuan Z X, Qiu P J, Tian P F 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 195104
- [43] Zhu S J, Qiu P J, Qian Z Y, Shan X Y, Wang Z, Jiang K, Tian P F 2021 *Opt. Lett.* **46** 2147
- [44] He X Y, Xie E Y, Islm M S, Purwita A, McKendry J J D, Gu E, Haas H, Dawson M D 2018 *International Conference on UV LED Technologies & Applications Conference (ICULTA-2018)* Berlin, Germany, April, 2018 pB41
- [45] Yu H B, Memon M H, Wang D H, Ren Z J, Zhang H C,

- Huang C, Tian M, Sun H D, Long S B 2021 *Opt. Lett.* **46** 3271
- [46] Floyd R, Gaevski M, Hussain K, Mamun A, Chandrashekhara M V S, Simin G, Khan A 2021 *Appl. Phys. Express* **14** 084002
- [47] Jia J X, Ruan Y D, Gu Y N, Zhang Z H, Zhang S D, Guo R Q, Cui X G, Tian P F 2024 *Opt. Express* **32** 22321
- [48] Tian P F, Shan X Y, Zhu S J, Xie E Y, McKendry J D, Gu E D, Dawson M D 2022 *IEEE J. Quantum Elect.* **58** 1
- [49] Gu Y N, Zhang Z H, Tian P F 2024 *The 7th International Workshop on Ultraviolet Materials and Devices* Taipei, China, Jun 2–5, 2024 p1
- [50] Tian P F 2024 *China Patent* CN 221485664U (in Chinese) [田鹏飞 2024 中国专利 CN 221485664U]
- [51] Ruan Y D, Li H G, Jia J X, Gu Y N, Zhang Z H, Shen D Q, Hong W, Cui X G, Zhang S D, Bai Y Z, Tian P F 2025 *Opt. Laser Technol.* **181** 111902
- [52] Zhao Z Q, Shan X Y, Zhu S J, Qian Z Y, Cui X G, Zhang S D, Tian P F 2023 *19th China International Forum on Solid State Lighting & 2022 8th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS)* Suzhou, China, February 7–10, 2023 p312
- [53] Yang F C 2020 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [杨方超 2020 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [54] Yang F C, Bai Y Z, Hong W, Li H G, Liu L, Sumner T J, Yang Q F, Zhao Y J, Zhou Z B 2020 *Classical Quant. Grav.* **37** 115005
- [55] Lu S P, Bai J X, Li H B, Jiang K, Ben J W, Zhang S L, Zhang Z H, Sun X J, Li D B 2024 *J. Semicond.* **45** 012504
- [56] Pandey A, Mi Z T 2022 *IEEE J. Quantum Elect.* **58** 3300313
- [57] Floyd R, Gaevski M, Alam M D, Islam S, Hussain K, Mamun A, Khan A 2020 *Appl. Phys. Express* **14** 014002
- [58] Xiao S D, Yu H B, Memon M H, Jia H F, Luo Y M, Wang R 2023 *IEEE Elect. Device Lett.* **44** 1520

REVIEW

Application of ultraviolet light sources in charge management systems for space gravitational wave detection^{*}

Ruan Yuan-Dong¹⁾ Zhang Zhi-Hao¹⁾ Jia Jiang-Xie¹⁾ Gu Yu-Ning¹⁾
 Zhang Shan-Duan¹⁾ Cui Xu-Gao¹⁾ Hong Wei²⁾
 Bai Yan-Zheng²⁾ Tian Peng-Fei^{1)†}

1) (*School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

2) (*School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 9 August 2024; revised manuscript received 3 October 2024)

Abstract

Gravitational waves are a kind of matter wave, which is caused by the violent motion and changes of matter and energy. Detecting gravitational waves allows people to observe the universe from a new perspective. In the process of gravitational wave detection, high-energy particles and cosmic rays in space can penetrate the exterior of the spacecraft and reach the surface of the inertial sensor's test mass (TM), continuously accumulating charges. Once the charge on the TM exceeds a certain threshold, the electrostatic forces between the TM and surrounding conductors generate significant acceleration noise, which will affect the measurement accuracy of the inertial sensors and, consequently, the success of the gravitational wave detection mission. Therefore, controlling the charge on the TM surface, known as charge management, is essential. The most commonly used charge management method is based on the photoelectric effect, using ultraviolet (UV) light to control the potential between the surface of the TM and the surrounding conductors. In previous charge management systems (CMSs), UV mercury lamps and UV light-emitting diodes (LEDs) were used as light sources, achieving varying levels of success. This paper mainly reviews the research progress of UV light sources in CMS for space gravitational wave detection. Mercury lamps, as the first-generation system light sources, can fulfill the mission but have some drawbacks such as slow startup, high power consumption and significant electromagnetic interference. UV LEDs, because of their advantages in size and weight, have gradually become the current light source for CMS. In recent years, with the development of UV micro-LED technology, UV micro-LEDs have achieved higher external quantum efficiency and lower power consumption, demonstrating their potential applications in CMS, and becoming a promising UV light source for future charge management systems.

Keywords: charge management, ultraviolet, LED, micro-LED

PACS: 04.30.-w, 04.80.Nn, 85.30.-z, 95.55.Ym

DOI: 10.7498/aps.73.20241115

CSTR: 32037.14.aps.73.20241115

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC2202503).

† Corresponding author. E-mail: pftian@fudan.edu.cn

空间引力波探测中电荷管理系统的紫外光源应用

阮远东 章志昊 贾芷懿 顾煜宁 张善端 崔旭高 洪葳 白彦峥 田朋飞

Application of ultraviolet light sources in charge management systems for space gravitational wave detection

Ruan Yuan-Dong Zhang Zhi-Hao Jia Jiang-Xie Gu Yu-Ning Zhang Shan-Duan Cui Xu-Gao Hong Wei Bai Yan-Zheng Tian Peng-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 220401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241115

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241115>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

AlGa_N基深紫外LED电子阻挡层的智能优化设计

Intelligent optimization design of electron barrier layer for AlGa_N-based deep-ultraviolet light-emitting diodes

物理学报. 2023, 72(4): 048502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222004>

深紫外双层金属光栅偏振器的设计与分析

Design and analysis of bilayer metallic grating polarizer in deep ultraviolet band

物理学报. 2021, 70(4): 044203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201403>

超晶格电子阻挡层周期数对AlGa_N基深紫外发光二极管性能的影响

Influence of period number of superlattice electron barrier layer on the performance of AlGa_N-based deep ultraviolet LED

物理学报. 2024, 73(12): 128503 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231969>

WO₃/β-Ga₂O₃异质结深紫外光电探测器的高温性能

Investigation of high-temperature performance of WO₃/β-Ga₂O₃ heterojunction deep-ultraviolet photodetectors

物理学报. 2023, 72(16): 160201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230638>

具有大光电导增益的氧化镓薄膜基深紫外探测器阵列

Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain

物理学报. 2022, 71(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220859>

极紫外光源及高荷态离子诱导下甲烷的脱氢通道碎裂机制

Fragmentation mechanism of methane dehydrogenation channel induced by extreme ultraviolet and high charge ions

物理学报. 2024, 73(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231377>