

极紫外光电效应电荷驱动仿真与试验验证

王子栋^{1,2,3} 周斌^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 惯性传感器中的检验质量是精密引力测量系统中的核心,其表面会因为宇宙高能粒子持续注入而积累电荷,在惯性传感器内部电磁场作用下产生杂散噪声,影响精密引力测量结果。根据光电效应原理,用UV LED产生极紫外光照射惯性传感器的电极与检验质量表面,并在电极间施加适当电场,就可以在不引入外力作用且无接触条件下改变检验质量的电荷量。本文基于平行板电容器的简化电极模型,对极紫外电荷驱动过程进行了理论建模仿真。在此基础上设计和构建了一套电荷驱动验证试验系统,针对光功率、偏置电压对充放电速率的影响和交流电荷驱动进行试验。试验证明电荷充放电速率与极紫外光功率成正比,其量子产率随极板间电场强度变化。最终可实现稳定控制检验质量电荷放电速率在 $0.31\sim 0.76\text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$,检验质量电荷充电速率在 $-0.05\sim -0.17\text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分析提出的检验质量电荷充放电速率理论模型与地面试验结果一致,可以有力支撑电荷管理控制系统的研制。

关键词 极紫外光, 电荷驱动, 光电效应, 建模仿真

中图分类号 V443

Simulation and Experimental Validation of Charge-driven Extreme Ultraviolet Photoelectric Effect

WANG Zidong^{1,2,3} ZHOU Bin^{1,2}

1(State Key Laboratory of Space Weather, Nation Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, Nation Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The test masses of the inertial sensor is the core of the precision gravity measurement system. The surface of test masses accumulates charges due to continuous injection of high-energy particles from space, which generates stray noise under the action of the internal electromagnetic field of the sen-

2023-03-20 收到原稿, 2023-05-25 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

sor and affects the precision gravity measurement results. According to the principle of photoelectric effect, use UV LED to generate extreme ultraviolet light to irradiate the electrodes of an inertial sensor and the surface of the test masses, and applying an appropriate electric field between the electrodes, it is possible to change the charge amount of the test masses without external forces and under non-contact conditions. Based on the simplified electrode model of the parallel plate capacitor, this paper carried out theoretical modeling and simulation of the extreme ultraviolet charge driving process. Based on this, a set of charge driving verification test system was designed and constructed, and experiments were carried out on the effects of light power and bias voltage on the charging and discharging rates and AC charge driving. The experiment proved that the charge-discharge rate is proportional to the extreme ultraviolet light power, and its quantum yield changes with the electric field strength between the plates. Ultimately, a stable control of the test masses discharge rate between $0.31 \text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.76 \text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ and charge rate between $-0.05 \text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ and $-0.17 \text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ can be achieved. The theoretical model of charge-discharge rate proposed in this article for the test masses is consistent with the results of ground experiments, which can strongly support the development of charge management and control systems.

Key words Extreme ultraviolet light, Charge driven, Photoelectric effect, Modeling and simulation

0 引言

在空间引力波探测中, 惯性传感器内的检验质量作为惯性基准, 为保证其沿测地线移动, 要求在检验质量上的非保守力必须尽可能小. 检验质量形状为立方体, 表面材料由金铂等重元素制成, 这对高能粒子有明显的阻滞作用. 因此, 来自银河宇宙射线 (GCRs)^[1] 和太阳高能粒子 (SEPs)^[2,3] 会轻易穿透航天器, 在检验质量上不断积累电荷, 根据 Vocca 等^[2] 利用 Fluka 仿真模拟的参数化太阳极大与极小年质子和氦核能谱注入 LISA 探路者相对复杂几何模型中的充电率, 得到在太阳极大年充电速率为 15.13 s^{-1} , 在太阳极小年充电速率为 38.2 s^{-1} . 携带足够电荷量的检验质量将受到静电力和洛伦兹力干扰, 在加速度测量谱中形成噪声^[4], 严重影响引力波探测过程. 以 LISA Pathfinder 航天器为例, 在检验质量释放 24 h 后, 检验质量在宇宙粒子充电效应的影响下, 电势达到了 1.1 V, 此时在 1 mHz 产生的加速度噪声超出了规定的加速度上限 $10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[5].

宇宙射线的能量非常高, 在空间探测领域无法完全有效屏蔽, 需要选择电荷控制方法缓解检验质量带电的问题. 在 GOCE^[6,7], CHAMP^[7] 等地球重力场探测卫星中所使用的加速度计普遍采用金丝连接的方式释放电荷, 该方法受到金丝噪声的影响^[8], 对于高精度引力探测项目无法适用. 基于光电效应的电荷管

理方法, 可以实现无接触消除检验质量表面积累的电荷. 美国 GP-B 任务中, 采用汞灯作为紫外光源, 实现了深紫外光诱导光电子发射的电荷管理, 将陀螺的残余加速度控制在 $4\times 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 以内^[9]. LisaPathfinder 任务也是采用汞灯作为光源, 在轨完成了对检验质量电荷管理的各项验证试验. 随着半导体技术的发展, LED 技术日趋成熟, 极紫外波段的 UV LED 相比汞灯光谱宽度更窄, 体积更小, 功耗更低, 成为当前电荷管理的主要光源. 美国斯坦福大学的 Saraf 等^[10] 对直流驱动模式下的 UV LED 进行了寿命, 辐射, MIL-STD1540 E 级热和振动测试, 结果在真空下 UV LED 寿命为 30000 h, 氮气下为 12000 h, 验证了 UV LED 在航天飞行中的鲁棒性. Sun 等^[11] 还对 UV LED 的光谱特性进行了相关测试, 时间长达数月的试验中驱动 UV LED 输出高于实际电荷管理需求的 10~15 倍光功率, 结果显示 UV LED 依然表现出了稳定的光谱特性, 中心波长不会随着器件老化发生明显移动. 帝国理工学院的 Hollington 等^[12] 研究了 UV LED 交流特性, 试验中用到的 SET-255 型号的 UV LED 脉冲频率可以高达 1 MHz, 并对其进行了寿命测试, 证明了试验中所用紫外光源在交流驱动模式下具有接近 25 年的使用寿命, 满足空间探测周期时间尺度^[13].

在主流静电驱动和位移传感器中, 均采用平行板电容器的传感技术, 但目前尚缺少详细描述电荷驱动

过程的理论模型. 本文基于平行板等效电容结构, 通过理论分析描述极紫外光在极板上吸收功率的分布, 推导理论上光电子的数量以及在电场作用下电荷驱动速率. 根据地面电荷管理试验, 验证理论分析的结果, 分析光功率、极板间电场等因素对系统充放电水平的影响, 并验证实际应用中所采用的交流充放电模式.

1 极紫外光电驱动建模仿真

在三个等间距的平行极板组成平行板电容器中, 当两端极板存在固定电位差, 在中间形成电场时, 中间极板在不带电荷的情况下, 其电位等于两端电位的中值. 而当中间极板被注入电荷时, 电位会发生变化, 反之测量到中间极板电位的变化, 可以计算极板电荷变化量. 中间极板与一端极板之间的电容为 C , 而中间极板的电荷变化 ΔQ 与电位变化 ΔU 的关系为

$$\Delta Q = 2C\Delta U. \quad (1)$$

要理想地控制电荷, 入射光子的能量需大于材料表面的功函数才能使表面电荷有足够的能量挣脱原子核的束缚从材料表面逸出, 即

$$\frac{c}{\lambda} - \phi > 0. \quad (2)$$

其中, c 为光速, λ 为入射光波长, ϕ 为材料表面功函数.

符合波长要求的紫外光源始终照射中间极板表面, 部分光线反射至偏压板表面, 因此中间极板和偏压板相对的两个表面均能产生光电子. 当有足够强的电场, 且方向如图 1(a) 所示时, 中间极板和偏压板上

产生的光电子都会在电场作用下进入中间极板, 中间极板的电子数量增加, 中间极板电位下降, 极板被充电. 当电场反向时, 所有光电子进入偏压板被导走, 中间极板电子减少, 电位上升, 极板被放电.

单一频率的光产生的光电子的最大初动能理论上等于光子能量与材料逸出功的差值, 但实际的光电子动能分布是比较复杂的. 在 Hechenblaikner 等^[14] 研究中, 考虑金属中电子的热能和隧道效应, 在室温条件下单波长光产生的光电子在垂直于表面方向上动能可以表示为一种常见的三角形分布.

三角形能量分布仅用两个参数 $E_{\max}$ 和 n 即可描述^[15], 如图 2(a) 所示. 参数 $E_{\max}$ 为逸出光电子所能具有的最大能量, 即 $E_{\max} = h\frac{c}{\lambda} - \phi$. 参数 n 是一个常数, 其值采取 Inchauspe 给出的 0.2^[16]. 在指定波长和逸出功时三角形分布定义如下^[17]:

$$f(E, \lambda) = \begin{cases} \frac{2E}{nE_{\max}^2(\lambda)}, & 0 < E \leq nE_{\max}(\lambda); \\ \frac{2}{(1-n)E_{\max}(\lambda)} - \frac{2E}{(1-n)E_{\max}^2(\lambda)}, & nE_{\max}(\lambda) < E \leq E_{\max}(\lambda); \\ 0, & E > E_{\max}(\lambda). \end{cases} \quad (3)$$

实际光源的光谱都具有一定宽度并呈现高斯分布 $g(\lambda)$, 试验中所用 UV LED 光谱分布如图 2(b) 所示, 垂直表面方向的光电子能量分布如图 2(c) 所示, 计算公式如下:

$$F(E) = \int_0^\infty g(\lambda) f(E, \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

中间极板受到紫外光线照射, 产生流向偏压板的光电子数量可由下式表示:

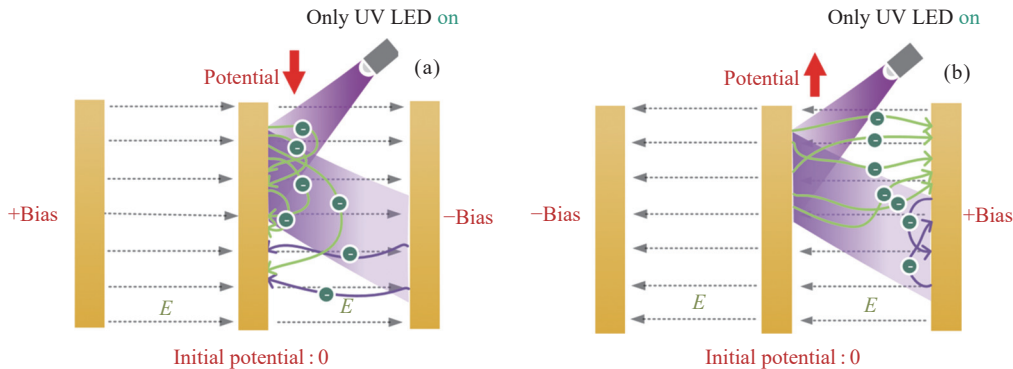


图 1 偏压板加负偏压 (a) 与加正偏压 (b) 时光电子的移动方向

Fig. 1 Direction of photoelectron movement when the bias plate is negatively biased (a) and positively biased (b)

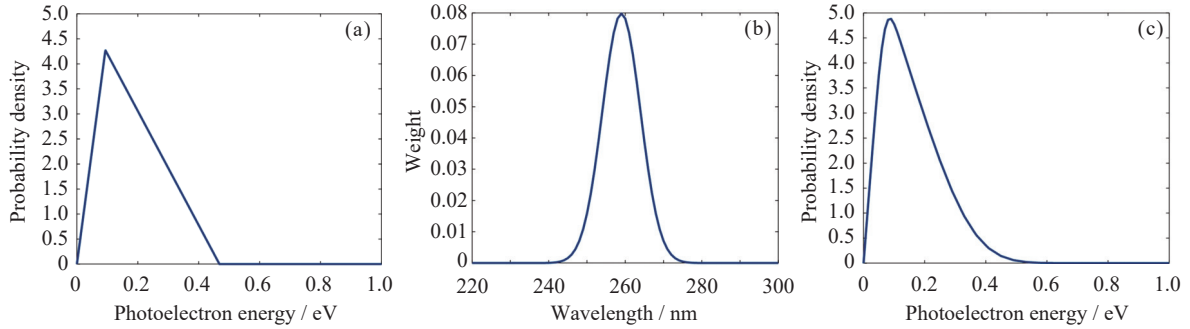


图 2 在单光源波长照射下垂直于表面方向的光电子动能分布 (a), 实际使用的 UV LED 光谱 (b) 以及在 UV LED 照射下垂直于表面方向的光电子动能分布 (c)

Fig. 2 Distribution of photoelectron kinetic energy perpendicular to the surface direction under single-source wavelength illumination (a), UV LED spectrum actually used (b), distribution of photoelectron kinetic energy perpendicular to the surface direction under UV LED illumination (c)

$$N_{i \rightarrow b}(t) = \begin{cases} Q(\Delta V) \int_0^{\frac{hc}{\phi}} \frac{P_i \lambda}{hc} g(\lambda) d\lambda, & \Delta V \leq 0; \\ Q(\Delta V) \int_0^{\frac{hc}{e\Delta V + \phi}} \left(\frac{P_i \lambda}{hc} \right) g(\lambda) d\lambda \cdot \int_{e\Delta V}^{E_{\max}(\lambda)} F(E) dE, & 0 < \Delta V \leq \frac{E_{\max}(\lambda)}{e}; \\ 0, & \frac{E_{\max}(\lambda)}{e} < \Delta V < +\infty. \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_i 为中间极板表面吸收的光功率; Q 为极板的量子产率, 金表面的量子产率一般在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级. 有研究表明外加电场使某些材料可能发生能带倾斜, 电子隧穿概率增加, 表现为光吸收能力增加^[18], 还有研究认为外加电场会促进逸出电子产生二次电子, 导致光电流提高^[19]. 基于上述研究, 认为在一定光功率下, 外加电场会提高电子逸出效率, 即量子产率提高, 所以在式 (5) 中认为, Q 为关于电场强度的函数. 由于板间电场有 $E = \frac{\Delta V}{D}$ (ΔV 为中间极板与偏压板的电势差, 即 $\Delta V = V_i - V_b$, 这里 V_i 为中间极板电势, V_b 为偏压板电势, D 为极板间距, 量子产率用 $Q(\Delta V)$ 表示; ϕ 为极板表面功函数, 在后续公式推导中三个极板表面的 Q 与 ϕ 假设一致, 实际上功函数与量子产率在不同表面结果可能不同; $g(\lambda)$ 为 UV LED 的波长分布; $F(E, \lambda)$ 中间极板受 UV LED 照射逸出光电子的能量分布. 以分析从中间极板流向偏压板的光电子数量为例, 当 $\Delta V \leq 0$, 中间极板逸出光电子受到正向电场力, 仅考虑入射光中符合光电效应波段的光功率即可; 当 $0 < \Delta V < \frac{E_{\max}(\lambda)}{e}$, 逸出光电

子受到反向电场力, 只有具备足够能量的光电子才能克服电场力, 流向偏压板表面; 当 $\frac{E_{\max}(\lambda)}{e} < \Delta V < +\infty$, 由于板间电场过大, 中间极板逸出的光电子能量均不能克服反向电场. 在这种情况下, 从中间极板流向偏压板的光电子数为 0, 计算从偏压板流向中间极板的光电子数量与式 (5) 同理, 即中间极板单位时间内的净光电子变化量可表示为

$$\Delta N_i(t) = \begin{cases} Q(\Delta V) \int_0^{\frac{hc}{\phi}} \frac{P_i \lambda}{hc} g(\lambda) d\lambda, & -\infty \leq \Delta V < -\frac{E_{\max}(\lambda)}{e}; \\ Q(\Delta V) \left[\int_0^{\frac{hc}{\phi}} \frac{P_i \lambda}{hc} g(\lambda) d\lambda - \int_0^{\frac{hc}{e\Delta V + \phi}} \left(\frac{P_b \lambda}{hc} \right) g(\lambda) d\lambda \cdot \int_{e\Delta V}^{E_{\max}(\lambda)} F(E) dE \right], & -\frac{E_{\max}(\lambda)}{e} \leq \Delta V \leq 0; \\ -Q(\Delta V) \left[\int_0^{\frac{hc}{\phi}} \frac{P_b \lambda}{hc} g(\lambda) d\lambda - \int_0^{\frac{hc}{e\Delta V + \phi}} \left(\frac{P_i \lambda}{hc} \right) g(\lambda) d\lambda \cdot \int_{e\Delta V}^{E_{\max}(\lambda)} F(E, \lambda) dE \right], & 0 < \Delta V \leq \frac{E_{\max}(\lambda)}{e}; \\ -Q(\Delta V) \int_0^{\frac{hc}{\phi}} \frac{P_b \lambda}{hc} g(\lambda) d\lambda, & \frac{E_{\max}(\lambda)}{e} < \Delta V < +\infty. \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta N_i(t) > 0$ 表示中间极板释放光电子, $\Delta N_i(t) < 0$ 表示得到光电子.

2 试验系统设计与仿真

根据以上简化模型构建一个平行板电容器试验

系统, 验证基于光电效应的电荷驱动. 如图 3 所示, 在两块偏压板之间固定略小的中间极板, 以降低边界效应. 两边偏压板施加的电位为 V_b 和 $-V_b$, 在中间极板不带电的情况下, $V_i = 0$ V, 电场保持稳定. 光纤将 UV LED 的光引入到试验系统中从上部倾斜照射中间极板, 反射到相对偏压板表面. 试验系统安装在真空系统内, 中间极板的电位由真空系统外的静电计测量. 信号发生器产生试验中需求的偏置电压和 LED 驱动信号.

紫外光采用 $\alpha=75^\circ$ 倾斜角照射中间极板, 并反射到偏压板. 按照试验使用的光源参数设置仿真模型,

通过光路的仿真, 观察到入射中间极板的光是正偏压板的 2.87 倍, 电荷控制极板与偏压板表面的照度分布如图 4 所示. 根据文献 [17], 光在理想表面的反射率与光入射角度有关, 在反射界面上没有反射出去的光子将参与到光电效应中, 这部分能量表现为表面吸收光功率. 根据试验设计, 当中间极板吸收光功率为 $4.9 \mu\text{W}$ 时, 偏压板吸收光功率为 $1.6 \mu\text{W}$. 仿真得到的吸收光功率可以直接代入式 (5) 计算.

3 试验结果处理与分析

基于极紫外光电效应的电荷驱动试验系统如

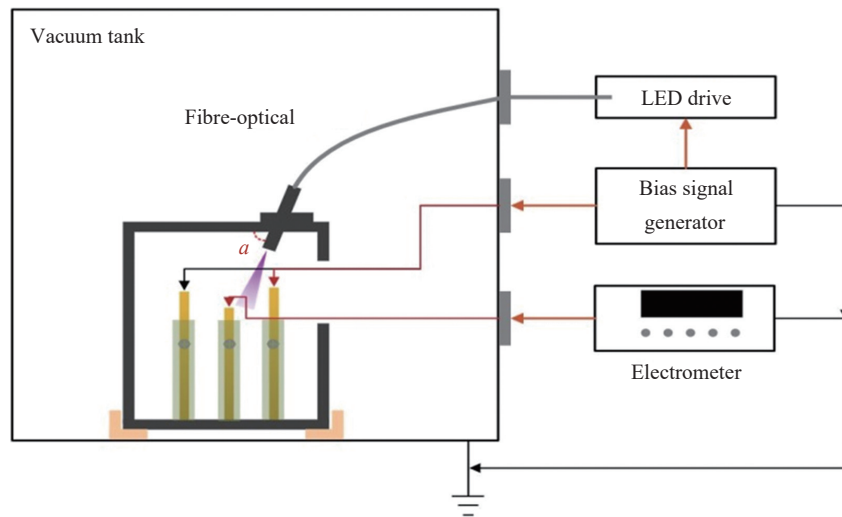


图 3 极板封装结构

Fig. 3 Polarizer packaging structure

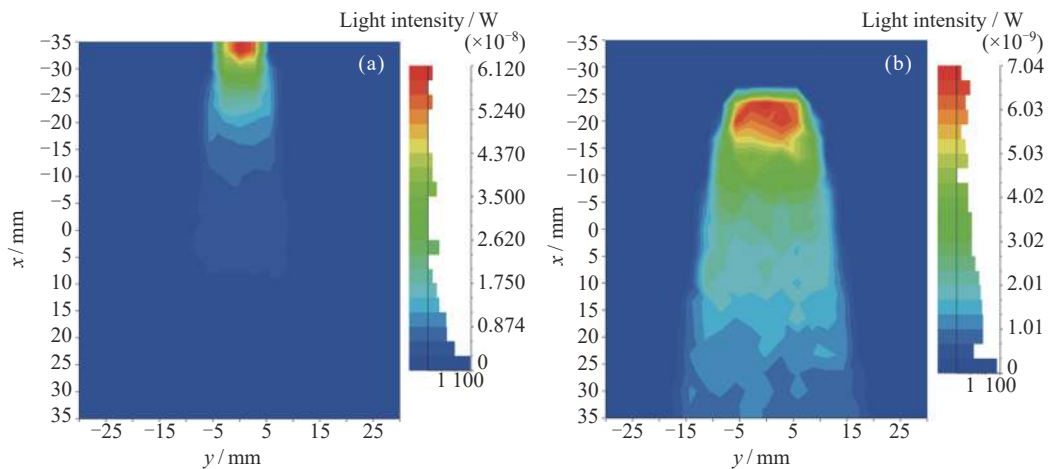


图 4 中间极板表面照度 (a) 及偏压板表面照度分布 (b)

Fig. 4 Surface illuminance distribution of the middle polarizer (a) and surface illuminance distribution of the biasing polarizer (b)

图 5 所示. 真空箱内为弱真空环境, 真空度保持在 0.1 kPa, 根据文献 [18], 在 $10^{-3} \sim 10^3$ Pa 压力之间, 由于环境中气体过于稠密, 使得光线中部分光子被气体分子吸收, 同时在这种弱真空中会存在中性粒子与光电子的相互作用, 逸出的光电子易于被气体分子捕获, 影响到宏观的光电流. 在一定压力下, 电子自由程可以表示为^[19]

$$\lambda_e = \frac{4KT}{p\pi d_m^2}. \quad (7)$$

其中, p 为压力, d_m 为分子直径, K 为玻尔兹曼常数, T 为温度. 当压力为 0.1 kPa 时, λ_e 为 6.65×10^{-3} cm, 地面试验中使用的极板间距为 6 mm. 在弱真空环境下的电荷控制过程中, 分子吸收和光电子碰撞难以评估, 且最终将宏观反映至有效光电子数量变化, 根据式 (6), 可以认为真空度在不满足电子自由程的情况下, 这种影响以常量的形式存在, 于是本试验将这个常量影响耦合计入量子产率.

真空箱内部接地用于屏蔽外界干扰信号. 极板封装结构置于真空箱内, 由于地面试验采用 ± 5 V 偏压, 预计极板电容容纳电子个数为 10^9 , PEEK 材料在常温下体积电阻率达 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$, 壳体底部使用四个 PEEK 材料的 L 型结构垫起, 可以使漏电流维持在 10^3 s^{-1} , 满足与真空箱之间的绝缘需求, 在壳体能被支撑起来的前提下, L 型结构与壳体之间的接触面积应该尽可能小, 进一步减少系统中漏电流对放电过程的影响. 利用 PEEK 螺钉将三个极板固定在 U 形件之间. 光源输入由 UV LED, 光学透镜与光纤耦合器组成. 中间极板的电位信号用三同轴电缆引出, 连接到真空箱的 6514 静电计, 采用 Guard 模式测量可以

将测量引起的电荷损失降到最小. 利用 Labview 开发了上位机软件, 可以通过串口通信来读取静电计测量结果, 控制 FPGA, 调节偏压信号与光源驱动信号的参数.

3.1 直流充放电试验

直流充放电试验目的是验证紫外光功率和偏压产生的电场对电荷驱动能力的影响. 综上分析可以看出, 板间电势差会影响电子逸出效率, 所以在不同偏压下, 中间极板的初始充放电速率应该是不同的. 光功率与激发光电子数量成正比, 驱动电流改变光功率会改变充放电速率.

当紫外光输入功率设置为 $18 \mu\text{W}$ 时, 偏置电压绝对值设置为 1~5 V, 得到的中间极板放电与充电过程分别如图 6(a)(b) 所示, 极板饱和电势与偏置电压一致. 为分析中间极板平均电荷变化速率与板间电势差的关系, 将窗口宽度设置为 0.4 V, 横坐标为板间电势差的绝对值, 例如图 6(c) 横坐标为 5 V, 对应的是板间电势差绝对值为 [5 V, 4.6 V] 的数据段, 纵坐标则是该数据段的平均电荷变化速率, 试验结果如图 6(c) 所示, 在确定极板电势下, 电荷变化速率随着偏压增大而上升, 在确定板间电势差下, 不同偏压下的电荷变化速率基本一致, 这表明平均电荷变化速率与板间电势差存在正比关系, 通过拟合偏压为 5 V 时的试验数据得到量子产率与电势差之间关系可以用二次多项式描述. 由于充放电过程中光电子的源极板不同, 中间极板与偏压板材料表面属性势必存在差异, 所以放电与充电过程中 $Q(\Delta V)$ 使用不同的二次多项式描述, 放电时 $Q(\Delta V)$ 表示为

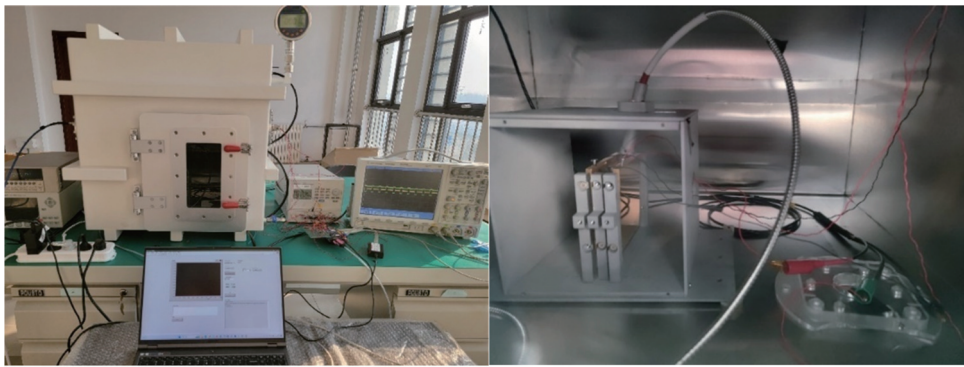


图 5 地面试验系统中仪器整体连接及真空箱内部信号连接

Fig. 5 Overall connection of the instrument in the ground experimental system and the internal signal connection of the vacuum chamber

$$Q(\Delta V) = -1.187 \times 10^{-8} \Delta V^2 - 1.777 \times 10^{-7} \Delta V + 1.537 \times 10^{-7}, \quad (8)$$

充电时 $Q(\Delta V)$ 表示为

$$Q(\Delta V) = -1.933 \times 10^{-8} \Delta V^2 + 1.765 \times 10^{-7} \Delta V + 1.571 \times 10^{-7}. \quad (9)$$

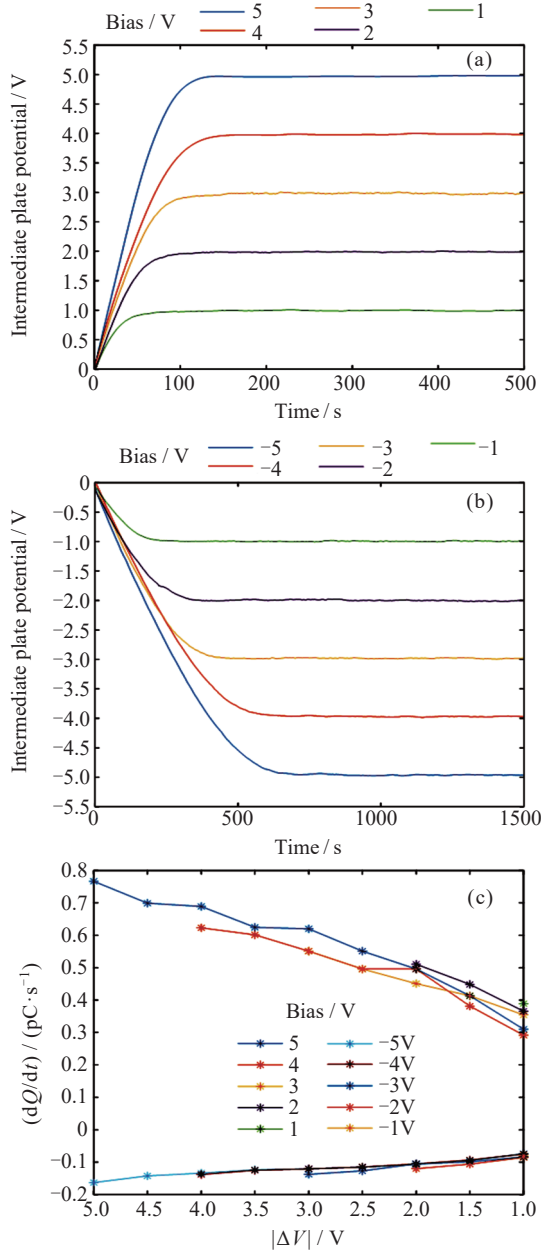


图6 中间极板放电 (a)、充电 (b) 的电势变化以及平均电荷变化速率随板间电势差变化趋势 (c)

Fig. 6 Potential change of the middle electrode during discharging (a), charging (b), and average charge rate of the middle electrode changes with the potential difference between the plates (c)

试验中偏压绝对值设置为 5 V, 通过调整驱动电流将光功率从 $6 \mu W$ 调整到 $18 \mu W$, 中间极板放电过程与充电过程的电势变化分别如图 7(a)(b) 所示, 可以看到充放电速率都出现了明显的随光功率成正比

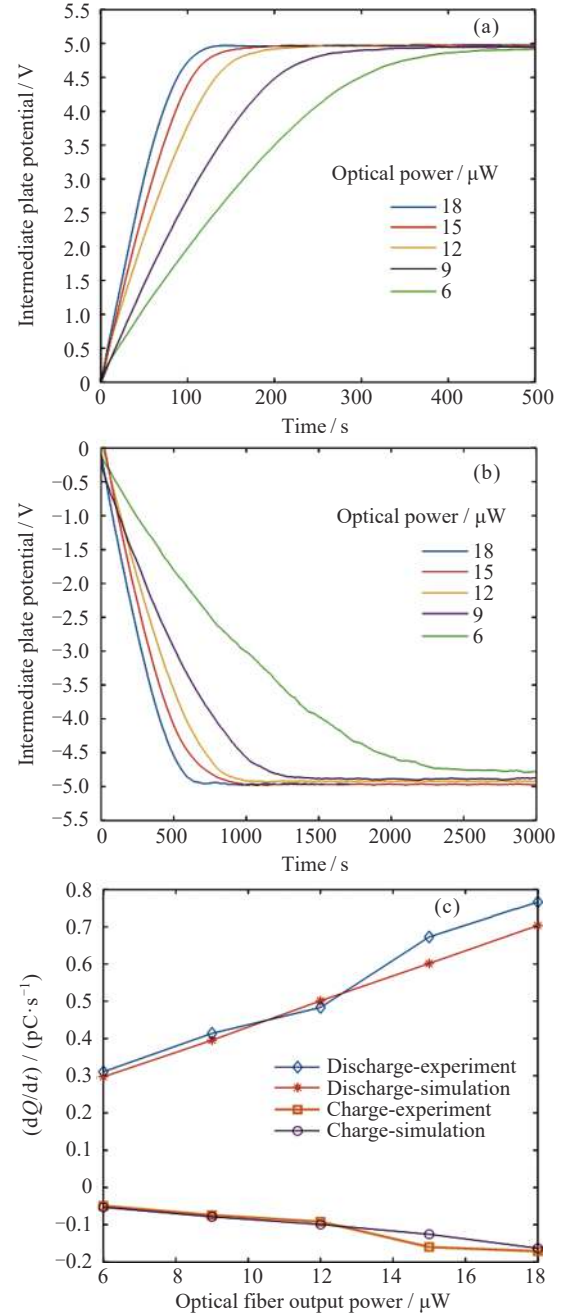


图7 中间极板放电 (a)、充电 (b) 的电势变化以及电势平均电荷变化速率 (c)

Fig. 7 Potential change of the middle electrode during discharging (a), charging (b), and average rate of charge change for the absolute value of the intermediate plate potential (c)

的单调变化, 图 7(c) 给出了极板电势绝对值在 $[0, 0.4 \text{ V}]$ 电荷变化速率, $\frac{dQ}{dt}$ 与光功率 P 之间良好的线性关系符合预期, 放电时可以表示为

$$\frac{dQ}{dt} = 0.034P + 0.094, \quad (10)$$

充电时为

$$\frac{dQ}{dt} = -0.009P + 0.004. \quad (11)$$

将紫外光输入光功率 $12 \mu\text{W}$, 偏置电压绝对值为 5 V 时试验数据与改善后的仿真结果对比, 如图 8

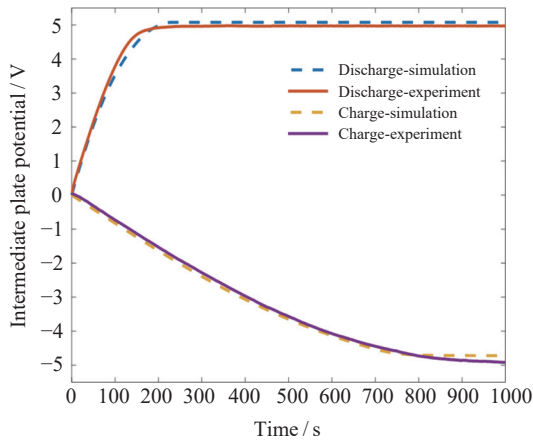


图 8 仿真结果与对应条件下的试验结果对比

Fig. 8 Simulation results are compared with the experimental results under the corresponding conditions

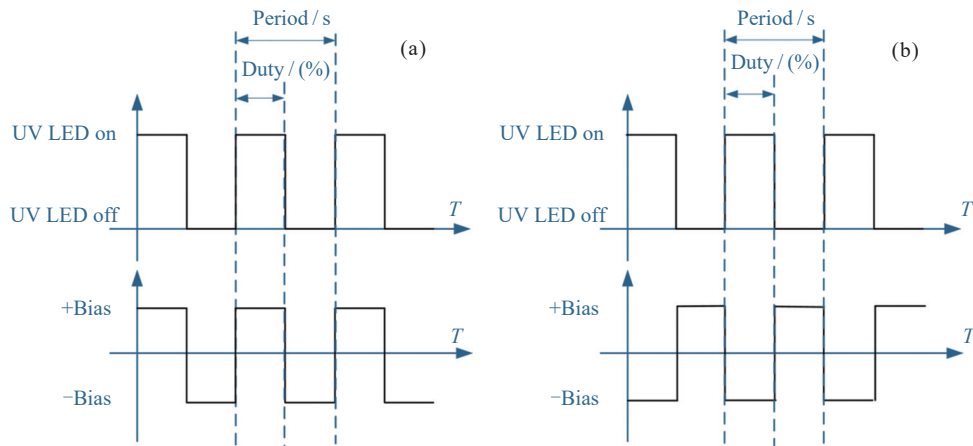


图 9 交流控制中的信号相位关系. (a) UV LED 驱动信号与偏压信号同相实现放电过程, (b) 两个信号反相即可实现充电过程

Fig. 9 Signal phase relationship in AC control. (a) UV LED driving signal and bias voltage signal are in phase to achieve the discharge process, (b) two signals can be out of phase to achieve the charging process

所示. 图中试验饱和电势与仿真结果存在微小误差, 这有可能是因为偏压板表面功函数小于中间极板表面功函数, 使偏压板逸出的光电子具备的 $E_{\max}$ 更大, 所以造成放电饱和电势略小, 充电饱和电势略大的现象. 总体来说, 试验结果与理论推导结果一致性较高, 误差在允许范围内, 这充分证明了文中描述的紫外光驱动理论模型是有效的.

3.2 交流充放电试验

未来在轨运行中将主要采取交流电荷管理方法, 通过该方法可以实现科学频带外控制极板表面电荷量, 该方法通过改变偏压板与 UV LED 驱动信号之间相位关系实现同相控制 (中间极板放电) 与反相控制 (中间极板充电), 如图 10 所示. 试验中, 采用 1 kHz 的方波进行驱动, 偏压板的方波幅值为 $\pm 5 \text{ V}$, 光纤输出端光功率为 $18 \mu\text{W}$, 信号占空比设置为 50% . 目前 UV LED 器件技术水平可以实现光电效应达到 MHz 响应^[12], 所以交流状态下电荷驱动效果可以用直流驱动的理论模型进行解释.

表 1 给出的是交流试验信号设置时间序列. 在偏置电压绝对值为 5 V , 紫外光输入光功率 $18 \mu\text{W}$, 驱动信号频率 1 kHz , 占空比 50% 交流控制条件下, 试验结果如图 10 所示, 在 $0 \sim 503 \text{ s}$, UV LED 打开, 偏置电压相位为 0° , 中间极板从 0 电位附近放电至 $+4.87 \text{ V}$, 过程中电荷变化速率从 $0.3 \text{ pC}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 0 . 在 $503 \sim 686 \text{ s}$, UV LED 关闭且不施加偏置电压, 此时中间极板电势从 4.87 V 下降至 4.86 V , 这是

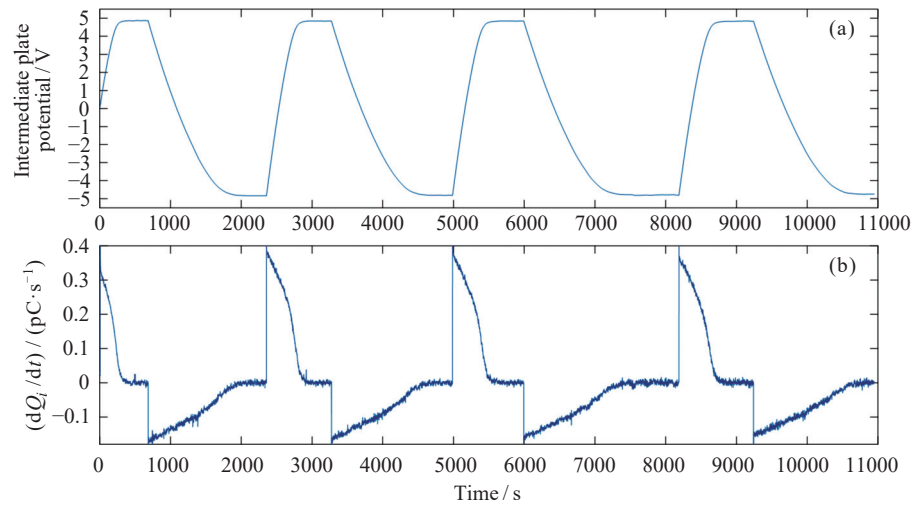


图 10 中间极板在交流控制下的电势变化 (a) 以及对应电势变化率 (b)
Fig. 10 Potential change of the middle electrode under AC control (a) and corresponding rate of potential change (b)

表 1 交流试验时间序列
Table 1 AC experiment time sequence

UV LED	信号相位/(°)		时间/s
	0	180	
✓	✓	×	503
×	×	×	686
✓	×	✓	2357
✓	✓	×	3265
✓	×	✓	5000
✓	✓	×	5994
✓	×	✓	8187
✓	✓	×	9242
✓	×	✓	10944

注 UV LED: ✓表示UV LED开启, ×表示UV LED关闭. 信号相位: ✓位于0°表明UV LED信号与偏压信号同相, 位于180°表明UV LED信号与偏压信号反相.

由系统中 fA 量级漏电流引起的, 其直接导致试验中饱和电势略小于仿真中的结果. 随后将 UV LED 打开, 偏置电压相位 180°, 中间极板从 4.87 V 下降到 -4.83 V, 电荷变化速率从 -0.17 pC 到 0. 在 2357~10944 s 中, 又循环进行了三组充放电试验. 随着时间的增加, 放电与充电的饱和电势略微下降, 这是由于在试验过程中没有持续保持目标真空度, 真空箱内真空度从起初 0.1 kPa 上升到 0.3 kPa, 光电子与空间分子碰撞次数增多, 光电子自由程缩短, 光电流下降

导致的^[19].
进一步对交流电荷控制结果进行分析讨论. 图 11(a)(b) 分别给出了截取交流控制试验中间极板电势 0~4.8 V(2530~3030 s) 与 0~-4.8 V(3735~4935 s) 变化曲线并与所建模型的仿真结果进行对比, 由于交流控制试验占空比选择为 50%, 则将仿真模型在直流状态下极板光吸收功率乘以系数 0.5, 得到新的模型电势变化曲线. 从图 11 可以看出, 极板充放电过程中两者均能较好吻合, 从而证明在 1 kHz 以下的交流控制效果可以看作直流控制状态的叠加. 此外, 从图 11 还可以看出, 交流试验中的饱和电势略低于仿真结果, 系统漏电流造成交流模式中每周期等效电荷驱动速率略微小于同时间下的直流控制状态, 从而导致饱和电势下降, 漏电流可能来源于仪器硬件以及结构接触等.

4 讨论与结论

对极紫外光源下的电荷驱动过程进行了仿真计算, 给出了中间极板电势随时间变化的仿真结果. 通过地面试验验证了直流模式下光功率, 偏置电压对充放电的影响, 试验结果表明光功率与电荷变化速率成线性正比, 在分析偏置电压影响环节中, 发现电势差的大小影响极板逸出电子的效率, 板间电势差与电荷变化速率成二次关系. 以上现象与文中建立的理论模型一致, 证明了模型的有效性. 根据试验结果, 对模型

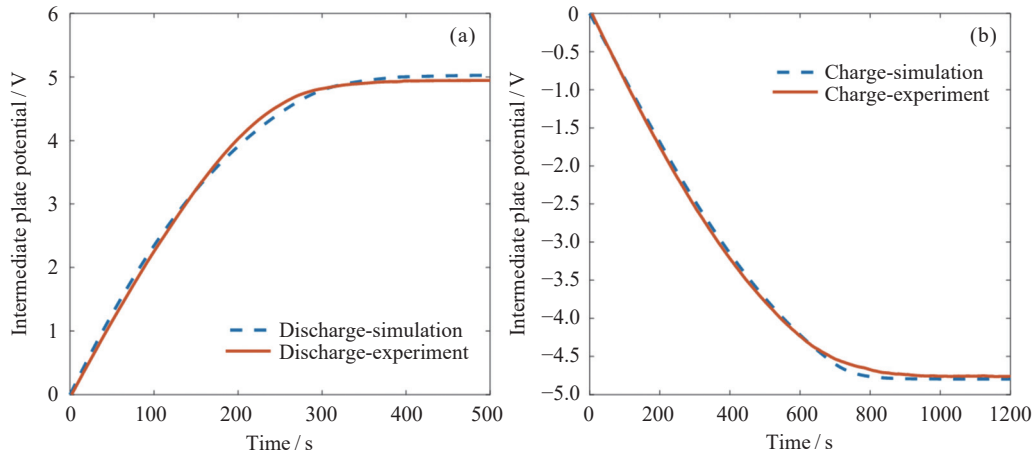


图 11 交流放电试验中 2530~2767 s 放电与模型放电曲线对比 (a) 以及 3735~4321 s 充电曲线与模型充电曲线对比 (b)

Fig. 11 Comparison of discharge curves from 2530 to 2767 seconds in AC discharge tests with model discharge curves (a) and comparison of charging curves from 3735 to 4321 seconds in AC discharge tests with model charging curves (b)

参数进行了进一步的修正,可作为后续电荷管理控制算法的理论依据.最后验证了交流控制极板充放电过程,试验结果符合预期,相较于直流控制,交流放电可以在科学探测频带外进行,降低噪声引入.文中使用了频率为 1 kHz 方波信号进行交流放电试验,试验结果表明在该频率及以下频率可以认为是直流信号的叠加,当需要进一步提高极高信号频率时,由芯片产生方波信号的建立时间和保持时间将不能忽略,可以通过选择更高规格的芯片来减少误差.经过仿真也发现光源的位置与角度对紫外光在两个极板的分布有着较大的影响,未来可通过试验标定确认实际情况中的光功率分布.真空环境的真空度对电荷充放电速率也存在微弱影响,在实际空间探测应用中,检验质量工作在高度真空环境下,不存在这一因素的影响.在文中所示极板结构中,中间极板的顶层会有较极板正对表面弱的光线入射,这会使试验结果与仅考虑板间光功率情况下的仿真结果存在误差.这是板间间距过小和光纤端出射具有一定发散角导致的,后期需要对试验系统结构进行改善.

通过理论建模与试验研究,证明了基于 UV LED 极紫外光电效应对孤立导体进行无接触电荷驱动具有频率高,线性度好等优势,有利于进一步设计基于这一物理效应的电荷管理系统,掌握其中的物理机制.同时验证了在测量过程中不间断进行电荷管理的方案具备可行性,为后续进一步研究电荷管理对引力

波探测频段的影响奠定基础.

参考文献

- [1] ARAÚJO H M, WASS P, SHAUL D, *et al.* Detailed calculation of test-mass charging in the LISA mission[J]. *Astroparticle Physics*, 2005, **22**(5/6): 451-469
- [2] VOCCA H, GRIMANI C, AMICO P, *et al.* Simulation of the charging process of the LISA test masses due to solar flares[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, **21**(5): S665-S670
- [3] KANG Weidong, LI Detian, LEI Jungang, *et al.* Gravity reference sensor test mass charge accumulation and control[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2020, **26**(2): 158-164 (康伟东, 李得天, 雷军刚, 等. 引力参考传感器检测质量块电荷积累与控制[J]. *真空与低温*, 2020, **26**(2): 158-164)
- [4] EWING B E. Charge management in LISA pathfinder: the continuous discharging experiment[Z]. Trento, Italy: Università di Trento, 2017
- [5] 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
- [6] CHEN Hao. The charge management research in the torsion pendulum[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013 (陈浩. 精密扭秤实验中的电荷管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013)
- [7] PAIL R, BRUINSMA S, MIGLIACCIO F, *et al.* First GOCE gravity field models derived by three different approaches[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, **85**(11): 819-843
- [8] WILLEMENOT E, TOUBOUL P. On-ground investigation of space accelerometers noise with an electrostatic tor-

- sion pendulum[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(1): 302-309
- [9] LI J, BENCZE W, DEBRA D, *et al.* On-orbit performance of Gravity Probe B drag-free translation control and orbit determination[J]. *Advances in Space Research*, 2007, **40**(1): 1-10
- [10] SARAF S, BUCHMAN S, BALAKRISHNAN K, *et al.* Ground testing and flight demonstration of charge management of insulated test masses using UV-LED electron photoemission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, **33**(24): 245004
- [11] SUN K X, LEINDECKER N, HIGUCHI S, *et al.* UV LED operation lifetime and radiation hardness qualification for space flights[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, **154**: 012028
- [12] HOLLINGTON D, BAIRD J T, SUMNER T J, *et al.* Characterising and testing deep UV LEDs for use in space applications[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2015, **32**(23): 235020
- [13] HOLLINGTON D, BAIRD J T, SUMNER T J, *et al.* Lifetime testing UV LEDs for use in the LISA charge management system[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2017, **34**(20): 205009
- [14] HECHENBLAIKNER G, ZIEGLER T, BISWAS I, *et al.* Energy distribution and quantum yield for photoemission from air-contaminated gold surfaces under ultraviolet illumination close to the threshold[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(12): 124914
- [15] WASS P J, HOLLINGTON D, SUMNER T J, *et al.* Effective decrease of photoelectric emission threshold from gold plated surfaces[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, **90**(6): 064501
- [16] INCHAUSPÉ H, OLATUNDE T, APPLE S, *et al.* Numerical modeling and experimental demonstration of pulsed charge control for the space inertial sensor used in LISA[J]. *Physical Review D*, 2020, **102**(4): 042002
- [17] HOLLINGTON D. The Charge Management System for LISA and LISA Pathfinder[D]. London: Imperial College London, 2011
- [18] ZHANG Qifeng, HOU Shimin, SHAO Qingyi, *et al.* Study of enhanced photoabsorption of BaO thin films in the near-ultraviolet band with applied vertical electric field on the surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(10): 2089-2093 (张琦锋, 侯士敏, 邵庆益, 等. BaO 半导体薄膜在外加垂直表面电场作用下的近紫外光吸收增强现象研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(10): 2089-2093)
- [19] KANG Weidong, LI Detian, LI Gang, *et al.* Research on UV light control technology for detecting mass charge with gravitational reference sensor[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, **27**(4): 407-410 (康伟东, 李得天, 李刚, 等. 引力参考传感器检测质量块电荷 UV 光调控技术研究 [J]. *真空与低温*, 2021, **27**(4): 407-410)

作者简介



王子栋 男, 1998 年 1 月出生于山东省菏泽市. 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为空间引力波探测中检验质量电荷管理技术.

E-mail: wangzidong20@mailsucas.ac.cn



周斌(通信作者) 男, 1979 年 10 月出生于辽宁沈阳, 现为中国科学院国家空间科学中心, 正高级工程师, 主要研究方向为空间磁场与电场探测技术研究.

E-mail: zhoubin@nssc.ac.cn