

文章编号 1004-924X(2011)10-2402-07

低功率水工质脉冲等离子体推进器的工作特性

朱平^{1,2*}, 侯丽雅¹, 章维一¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;

2. 中北大学电子测试技术国防重点实验室, 山西太原 030051)

摘要:为了解决 Teflon 脉冲等离子体推进器存在的性能低、有污染等问题,设计了以水为工质的脉冲等离子体推进器系统,并研究了它的主要工作指标的能量阈值。分析了水工质脉冲等离子体推进器系统的放电类型形成条件及原因,通过放电电压和电流测试实验,对工作能量阈值进行了实验研究,得到了稳定运行能量对应的储能电容值。实验结果表明:在足够高的电场强度和足够大的触发电流下,才能产生保证稳定工作触发概率的初始等离子体;而水工质脉冲等离子体推进器的正常工作能量范围由储能决定,与储能电容的容值不相关。研究结果为发展无污染、性能高、具有广适性的低功率水工质脉冲等离子体推进器打下了一定的基础。

关键词:水工质;脉冲等离子体推进器;放电类型;能量阈值

中图分类号:V228 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2402

Work characteristics of low power water propellant pulsed plasma thruster

ZHU Ping^{1,2*}, HOU Li-ya¹, ZHANG Wei-yi¹

(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*

2. *National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)*

** Corresponding author, E-mail: hyuanping@sohu.com*

Abstract: The paper designs a pulsed plasma thruster system based on water propellant and studies energetic threshold of its main working characteristics to solve the problems of low performance and high pollution of Teflon pulsed plasma thrusters. Based on an analysis of the forming condition and cause of electric discharge types, working energetic threshold is studied experimentally by the discharge voltage and current measurement. The study shows that the initial plasma that can provide trigger probability for steady operation and energy storage capacity are obtained only by enough electric-field intensity and trigger current, and the normal working energy range of the water propellant pulsed plasma thruster is decided by stored energies but not related to capacity values. The study provides a possibility for developing low power water propellant pulsed plasma thrusters of free pollution,

收稿日期:2011-01-27;修订日期:2011-03-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60778029);国家教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20060288005)

high performance and wide applications.

Key words: water propellant; pulse plasma thruster; discharge type; threshold energy

1 引 言

电推进系统以其优越的性能正在逐步取代传统的化学推进系统,并被广泛用于为航天器提供机动和控制推力^[1-4]。作为电推进的一种方式,脉冲等离子体推进器(Pulsed Plasma Thruster, PPT)以高比冲、低功耗、结构简单、重量轻、良好系统继承性和可靠性等特点,成为当前国际电推进研究的热点之一^[5-6]。典型的 PPT 使用 Teflon 作为工质,然而,Teflon PPT 存在一些问题^[7-9],如:主放电期间的低速蒸汽和大粒子的发散造成推进性能低、Teflon 烧蚀后产生的碳和氟污染飞船上的设备等,限制了 PPT 的实际应用。因此,研究无污染、高性能、具有广泛适用性的低功率 PPT 推进技术是值得研究的课题。

在过去的几十年间,为了提高 PPT 的性能和效率,研究人员进行了大量研究工作,却始终没有获得较大的成功。对 PPT 性能提高的研究^[10-11]主要集中在以下两个方面:通过改变固体推进剂和电极几何形状,推进剂供应方式来增强工质的电离;通过改变外部电路参数、电极材料、工质材料成分等方法来提高推功比。文献[12-14]提出了一种新的方法:用平均分子量或分子量较低的无污染工质替代 Teflon 来解决污染问题并提高性能。由于水与 Teflon 相比,能减少羽流污染,并具有更高比冲的可能,因此,本文在前人工作的基础上,研制了一种基于水工质的低功率脉冲等离子体推进器系统,旨在通过研究该系统的主要工作特性指标的能量阈值,为其结构优化设计和工作性能的研究奠定物质基础。

2 总体结构和工作原理

本文设计的水工质 PPT 的推功比 $>1 \mu\text{N} \cdot \text{s}/\text{J}$,动能能量转换效率 $>15\%$,其系统总体结构如图 1 所示。推进系统分为电源处理单元和推进器本体两大部分。电源处理单元包括主电源和触发电源;推进器本体由推进器结构和储能电容构

成,其中推进器结构包括电极、触发器、工质进给机构和喷嘴等。

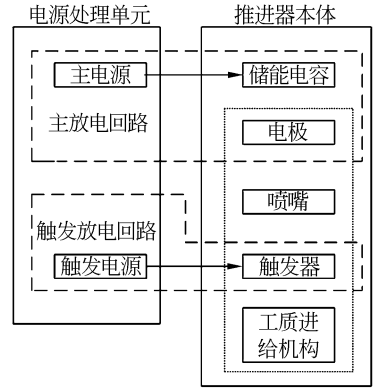


图 1 系统总体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of over system

水工质 PPT 的物理模型如图 2 所示。同轴阴极的内径为 7 mm,长 24 mm,材料为紫铜。实心阳极直径为 2.4 mm,材料为钨钨。阴极和阳极由绝缘构件隔离。触发器安装在阴极上。阴极和阳极如图 2 放置,且由绝缘构件隔离后密封,仅留水蒸气入口和喷嘴出口。水蒸气从推进器入口流入,经过阴极外侧的 4 个进气口进入其腔内后从喷嘴流出。高压直流电源接至电极,当电源电压升高到一定程度时,触发器接到控制信号后先起弧放电,接着发生器内部两电极间整体起弧放电,产生的等离子体和气体混合物便从喷嘴喷出。

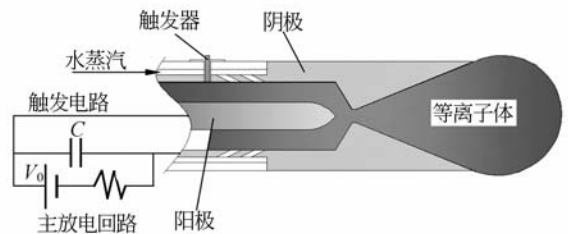


图 2 水工质 PPT 物理模型

Fig. 2 Physical model of water propellant PPT

3 电源处理单元

PPT 系统的电源处理单元由主放电电源和触发电源构成。其中,主放电电源采用高压恒流

充电技术,以满足主放电回路抗负载短路的固有 能力,详细的电路原理见图 3;触发方式采用第三 电极沿面闪络放电,触发电源采用低压大容量点 火电路,以满足在高真空环境下运行也能最大限 度地提高传递到阴极的能量密度,而不会产生巴 邢击穿损坏,详细的电路原理见图 4。为了保证 主通道的顺利放电,考虑变压器的反向电压摆动 输出的高频损失和匝数比与输出电流成反比等因 素,主放电电源选用电压最大幅值在 4 kV、连续 输出功率为 3 W 的高压电源模块,触发电源的电 容储能的实际设计值为 0.5~1 mJ。其中,储能 电容值为 2.2~5 μF ,充电电压为 DC20~30 V。

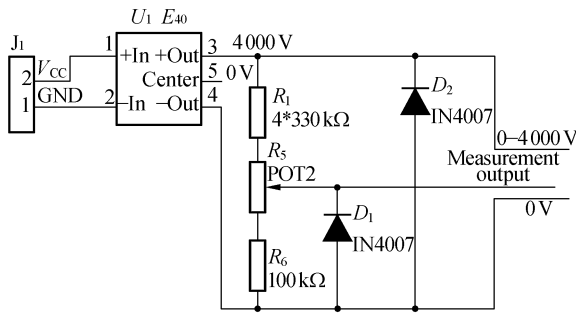


图 3 主放电回路原理图

Fig. 3 Block diagram of main discharge circuit

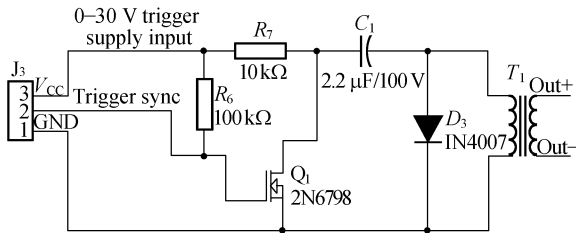


图 4 触发电路原理图

Fig. 4 Block diagram of trigger circuit

4 测量系统

水工质 PPT 工作时的放电电压幅值在几千 伏,持续时间只有几微秒到几十微秒,电流的最大 幅值在几千安至几万安,对这类脉冲大电流常采 用自积分罗氏线圈测量。由于罗氏线圈的测量范 围从 1 赫兹到几百兆赫兹,与放电回路没有直接 的电气联系,并且对放电回路的影响也较小。因 此,本文采用泰克示波器 TDS2004B、电阻分压

器、高压探头及罗氏线圈对水工质 PPT(流量 5 $\mu\text{g/s}$, $1\sim 10^{-2}$ Pa 气压)放电电压和电流进行测 量,取得了精确测量值。

5 测量实验与结果

5.1 放电类型判断及原因分析

PPT 的起弧放电机制本质是三电极间隙的 纵向等离子体触发,简述为:当触发间隙位于主电 极的阴极,触发装置释放出的电子电流触发击穿 主间隙,同时主阴极附近的高密度等离子体在主 阴极上触发出阴极斑点,使主间隙导通。主间隙 电流由触发装置释放出的电子电流和主阴极上阴 极斑点传导电流两部分组成。

在触发装置释放出的初始等离子体能够为主 间隙的导通提供足够带电粒子的前提下,根据主 间隙的储能状态形成 4 种放电类型:(1)稳定放 电;(2)不稳定放电;(3)不导通;(4)自发放电。这 里结合放电电压和电流测试实验结果对水工质 PPT 在 1 Hz 脉冲触发下的 4 种放电类型形成的 条件及原因进行具体分析。

5.1.1 稳定放电

在触发装置释放出的初始等离子体能够为主 间隙的导通提供足够带电粒子的前提下,当主间 隙的储能充足时,主间隙的放电电流具有足够带 电粒子的提供源,触发脉冲能够成功导通主间隙, 并稳定放电。

图 5 和图 6 分别为水工质 PPT 稳定放电时 ($C=2\ \mu\text{F}$, $U_0=1\ 500\ \text{V}$) 的电压波形和电流波形 实测图。从图中可知:主间隙被 1 Hz 触发脉冲导 通,并瞬接地放电(图 5)。此时水工质 PPT 的 放电电流因处于欠阻尼状态(图 6),在半个周期 后会过零,这就给熄弧提供了条件。由于放电过 程损耗大量能量,燃弧几个周期后,储能(储能电 容的能量)不足以产生反向恢复电压来引起重燃, 此时储能电容处于能量恢复阶段。从图 5 中的信 道 2 可以清楚看出这种现象。

5.1.2 不稳定放电

在触发装置释放出的初始等离子体能够为主 间隙的导通提供足够带电粒子的前提下,当主间 隙的储能不充足时,虽然触发装置释放出的初始 等离子体能够在主阴极上触发出阴极斑点,然而 储能却无法为主间隙的放电电流提供足够带电粒

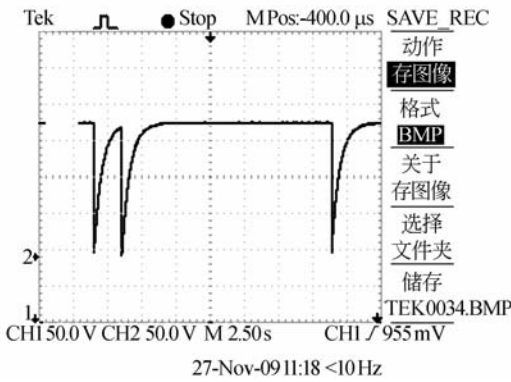


图 5 原始放电电压波形

Fig. 5 Original discharge voltage waveform

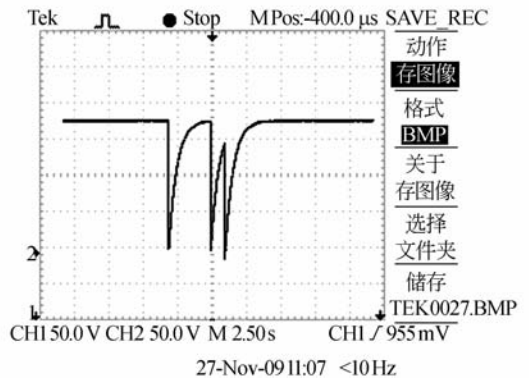


图 7 不稳定放电时的原始电压波形

Fig. 7 Original voltage waveform with unstable discharge

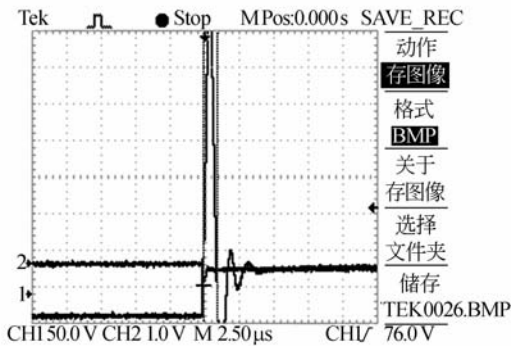


图 6 原始放电电流波形

Fig. 6 Original discharge current waveform

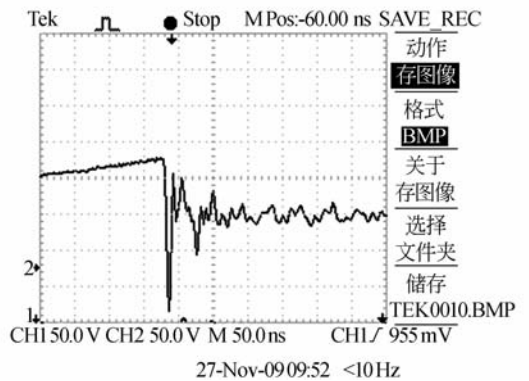


图 8 不导通时的原始电压波形

Fig. 8 Original voltage waveform with an conducting

子,因而放电过程就会出现不稳定的放电现象。

图 7 为水工质 PPT 不稳定放电时($C=2 \mu\text{F}$, $U_0=1\ 300\ \text{V}$)的电压波形实测图。从图中可见多次不规则地瞬间接地,这是由于储能不充足而不能为主间隙的放电电流提供足够带电粒子来引导主间隙导通,致使放电过程出现不规则及不完全放电。

5.1.3 不导通

在触发装置释放出的初始等离子体能够为主间隙的导通提供足够带电粒子的前提下,当主间隙的储能匮乏时,虽然触发装置释放出的初始等离子体能够在主阴极上触发出阴极斑点,然而储能却无法为主间隙的放电电流提供基本的带电粒子,致使产生的阴极斑点全部熄灭。

图 8 为水工质 PPT 不导通状态下($C=2 \mu\text{F}$, $U_0=900\ \text{V}$)的电压波形实测图。从图中可见,由于储能很不充足,不能为主间隙的放电电流提供基本的带电粒子,致使产生的阴极斑点全部熄灭。

这样,主间隙流过的电流在触发电流停止后终止,触发极恢复到绝缘状态,主间隙不能进入完整的自持放电阶段,电压波形呈现为衰减振荡波形。

5.1.4 自发放电

当主间隙的储能十分充足,主间隙的放电电流具有足够带电粒子的提供源时,主间隙不需要触发脉冲提供初始等离子体就能自持放电,成功导通,直至储能被消耗到无法产生反向恢复电压来引起重燃而熄弧。此时,三电极间隙的纵向等离子体触发的起弧放电机制已不适用于解释此状态。

在自发放电状态下,触发装置无法对水工质 PPT 的放电频率进行调制,而且过高的储能会使放电回路中的电容和传输线过热,造成外围电路发生不可逆热损伤。因此,水工质 PPT 设计时应严禁出现自发放电状态。

5.2 工作能量阈值

为了掌握水工质 PPT 的工作能量阈值,在放电类型形成的条件及原因分析的基础上进行了水工质 PPT 的工作能量阈值实验。水工质 PPT 实际上所需储能的大小与电极结构和工质的选择有较大关系,不同的电极结构对储能的要求是有明显区别的。针对本设计中采用的触发电路和推进器本体结构,在不考虑储能电容内阻和传输线损耗的前提下,利用储能电容在触发过程中所释放的能量来研究水工质 PPT 的工作能量阈值。

5.2.1 实验方法和步骤

水工质 PPT 储能电容的工作电压 U 与放电概率关系符合正态分布,可用概率论方法推定 $U_{50\%}$ (水工质 PPT 正常放电的概率为 50% 时储能电容的工作电压),实验研究方法则用升降法,步骤如下:

(1) 确定 100% 放电电压及下限 0% 放电电压推定 $U_{50\%}$ 和 σ , 实验次数为 10~19。

$$\sigma \approx \frac{U_{100\%} - U_{0\%}}{4 \sim 5}, U_{50\%} = \frac{U_{100\%} + U_{0\%}}{2}.$$

(2) 以一定电压级差 $\Delta U = (0.5 - 2)\sigma$, 使外施电压 $\dots U_{-3}, U_{-2}, U_{-1}, U_0, U_1, U_2 \dots$ 的阶梯变化来调整水工质 PPT 储能电容的工作电压。自 $U_{50\%} = U_j = 0$ 开始, 则下次减压就为 $U_{j-1} = U_j - \Delta U$, 下次加压就为 $U_{j+1} = U_j + \Delta U$, 以此类推, 共 19 次。

5.2.2 结果分析

用升降法得出水工质 PPT 储能电容的工作电压间与触发脉冲频率之间的关系, 确定出水工质 PPT 的工作能量阈值, 表 1 给出了在触发脉冲频率为 1 Hz 时, 储能电容分别在定容状态 2 μF 和 3 μF 下的水工质 PPT 的工作能量阈值实验结果。

表 1 水工质 PPT 的工作能量阈值

Tab. 1 Energy threshold of water propellant PPT

$(C=2 \mu\text{F})$		$(C=3 \mu\text{F})$	
存储能量/J	运行状态	存储能量/J	运行状态
0.81	不导通	1.22	不导通
1~2.25	不稳定	1.5~2.54	不稳定
2.56~6.76	稳定	2.94~7.26	稳定
7.29	自发放电	7.94	自发放电

从表 1 可知: 储能电容为 2 μF 和 3 μF 对应的最小稳定运行能量分别为 2.25 J 和 2.94 J。低于最小稳定运行能量值, 则水工质 PPT 运行在不稳定状态或处于不导通状态, 即水工质 PPT 正常放电的概率 $< 100\%$; 储能电容为 2 μF 和 3 μF 对应的最大稳定运行能量分别为 6.76 J 和 7.26 J。高于最小稳定运行能量值, 则触发脉冲失效, 水工质 PPT 处于自发放电状态、储能电容高度发热。

水工质 PPT 的工作能量阈值范围随储能电容值的变化略有不同, 定容 2 μF 时为 2.25~6.76 J; 定容 3 μF 时为 2.94~7.26 J。从不同定容状态的工作能量阈值范围可知, 水工质 PPT 的正常工作能量范围是由储能决定的, 而与储能电容的容值没有紧密联系。

6 结 论

本文研制了低功率水工质脉冲等离子体推进器实验系统, 系统能够正常工作, 为推进器的结构优化设计和工作性能研究奠定了物质基础。在水工质脉冲等离子体推进器系统的放电类型形成条件及原因分析的基础上, 通过放电电压和电流测试实验, 对主要工作特性指标的能量阈值进行了研究。实验结果表明: 在足够高的电场强度和足够大的触发电流下, 才能产生保证稳定工作触发概率的初始等离子体; 储能电容为 2 μF 和 3 μF 时对应的稳定运行能量分别为 2.25~6.76 J 和 2.94~7.26 J; 水工质脉冲等离子体推进器的正常工作能量范围由储能决定, 与储能电容的容值不相关。研究结果为发展无污染、性能高、具有广适性的低功率水工质脉冲等离子体推进器技术打下了一定的基础。

参考文献:

- [1] 尤政, 张高飞, 林杨等. MEMS 固体化学推进器设计与建模研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 117-126.
YOU ZH, ZHANG G F, LIN Y, *et al.*. Design and modeling of MEMS-based solid propellant propulsion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 117-126. (in Chinese)
- [2] 戴路, 金光, 陈涛. 基于 VSCMG 的卫星姿态控制仿真系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1546-1553.
DAI L, JIN G, CHEN T. Satellite attitude control simulation test bed based on VSCMG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1546-1553. (in Chinese)
- [3] CHRISTOPHER D R, MARK E C, MATTICK A T. Pulsed plasma thruster system for microsatellites [J]. *J Spac Rock*, 2005, 42(1): 161-170.
- [4] 尹乐, 周进, 缪万波, 等. 脉冲等离子体推力器放电波形设计评估仿真研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 490-495.
YIN L, ZHOU J, MIAO W B. Design and simulation of the discharge current wave for pulsed plasma thruster[J]. *J Propul Tech*, 2010, 31(4): 490-495. (in Chinese)
- [5] JUNJI U, JUNPEI I, YUKIYA K, *et al.*. Study on pulsed plasma thruster configuration to expand impulse bit range[C]. *29th International Electric Propulsion Conference, IEPC*, 2005: 234.
- [6] SCHONHERR T, KOMURASAKI K. Evaluation of discharge behavior of the pulsed plasma thruster SIMP-LEX[C]. *AIAA*, 2010: 6530.
- [7] SPANJERS G G, LOTSPEICH J S, MCFALL K A, *et al.*. Propellant losses because of particulate emission in a pulsed plasma thruster[J]. *J Propul P*, 1998, 14(4): 554-559.
- [8] MARKUSIC T E, KURT A P, CHOUEIRI E Y, *et al.*. Ablative z-pinch pulsed plasma thruster[J]. *J Propul P*, 2005, 21(3): 392-405.
- [9] DE ALESSANDRO R O, BRITO H, GALIAN E S. P4S-1 solid propellant pulsed plasma thruster development phase[C]. *AIAA*, 2009: 5281.
- [10] ARRINGTON L A, HAAG T W, PENCIL E J, *et al.*. A performance comparison of pulsed plasma thruster electrode configurations[C]. *25th International Electric Propulsion Conference, IEPC*, 1997: 127.
- [11] KUANG Y Z. Effects of propellant geometry on PPT performance[C]. *17th International Electric Propulsion Conference. IEPC*, 1984: 685-690.
- [12] HIROYUKI K, KAKAMI A, FURUTA Y, *et al.*. Liquid propellant pulsed plasma thruster[C]. *28th International Electric Propulsion Conference, IEPC*, 2003: 087.
- [13] ZHU P, HOU L Y, ZHANG W Y. The effect of easily ionized elements Na and K on the performance of pulsed plasma thruster using water propellant[J]. *Science China Tech. Sci.*, 2010, 53(10): 2878-2882.
- [14] ZHU P, HOU L Y, ZHANG W Y. The measurement on micro-jet impulse based on laser interferometer[J]. *2009 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition, FEDSM*, 2009, 78030(1): 1707-1714.

作者简介:



朱平(1976—),女,重庆人,博士研究生,讲师,2004年于中北大学获得硕士学位,主要从事低功率推进技术与器件的研究。E-mail: hyuanpeng@sohu.com



章维一(1943—),男,浙江临海人,教授,1982年于中国纺织大学获硕士学位,1990年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、医学工程等方面的研究。E-mail: zhangweiyi_email@163.com

导师简介:



侯丽雅(1954—),女,江西余干人,教授,1984年于北京航空航天大学获硕士学位,1995年于(日)法政大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、生物制造工程等方面的研究。E-mail: hou_liya@hotmail.com

● 下期预告

球面微通道板在极紫外波段的量子探测效率

尼启良¹,韩素立²,陈斌¹,王海峰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了满足大视场和高分辨率的要求,极紫外相机的重要组成部件之一光子计数成像探测器采用了球面微通道板。而球面微通道板的量子探测效率是探测器的一个重要参数。根据微通道板在极紫外(EUV)波段光电子产额理论模型,计算了球面微通道板在该波段下随不同入射角变化的电子产额。使用激光等离子体光源测量球面微通道板 EUV 波段量子探测效率,搭建了球面微通道板在该波段的量子探测效率的测量装置。测量了球面 MCP 不同位置的量子探测效率随波长和入射角的变化曲线,实验结果表明:当入射角为 15° 时的量子探测效率约为当入射角为 0° 时的 5 倍。