

引用格式: WANG Ye-ping, QIAN Yun-sheng, LANG Yi-zheng, *et al.* Study on Ionization Efficiency of Cesium Ion Source for Microchannel Plate Test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1223002
王叶萍, 钱芸生, 郎怡政, 等. 微通道板测试用铯离子源离化效率研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1223002

微通道板测试用铯离子源离化效率研究

王叶萍, 钱芸生, 郎怡政, 王自衡, 孔祥宇

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘 要: 为研究铯离子作为入射源轰击微通道板性能测试技术, 采用铯离子束产生器作为实验装置, 分析整个铯离子束产生过程, 进而研究铯原子轰击离化丝(钽, 脱出功为 4.12 eV)而产生的铯等离子体的离化效率的影响因素. 从物理过程分析出离化效率受离化环境温度、离化丝功率、聚焦电压等因素的影响, 结合沙哈-朗缪尔(Saha-Langmuir)方程, 分析出出射离子电流可作为离化效率的实际表征量. 实验通过改变离化环境温度、离化丝功率等因素, 采用运放反馈电流法测量离子电流的大小. 实验结果表明通过控制离化环境温度可维持输入铯原子数的稳定, 铯离子的离化效率受离化环境温度和离化丝功率影响较大. 当其他工作条件不变, 离化丝功率 Q_c 为 2.818 W 时, 离化效率达到最大; 当离化环境温度 T_c 为 110 °C 时, 离化过程稳定且最充分, 输出离子电流最大达到 25 nA 左右. 实验结果与理论模型分析结果具有较好的一致性. 通过对这些因素的控制可稳定调节铯离子束入射强度的大小.

关键词: 光电成像器件; 微通道板; 性能测试; 离化效率; 铯离子入射源; 等离子体

中图分类号: TN144+.4; O536

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1223002

Study on Ionization Efficiency of Cesium Ion Source for Microchannel Plate Test

WANG Ye-ping, QIAN Yun-sheng, LANG Yi-zheng, WANG Zi-heng, KONG Xiang-yu
(College of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to study the performance test technology of cesium ion bombarding microchannel plate, a cesium ion beam generator was used as an experimental device. To analyze the whole process of cesium ion beam generation and study the factors affecting the ionization efficiency of cesium plasma generated by cesium atom bombarding ionized filament (tantalum, with a desorption work of 4.12 eV). From the physical process, it is found that the ionization efficiency is affected by the ionization environment temperature, the power of ionization filament and the focusing voltage. Combined with the of Saha-Langmuir equation, it is analyzed that the emitted ion current can be used as the actual characterization of the ionization efficiency. In the experiment, the ion current was measured by feedback current method of operational amplifier by changing the factors of ionization environment temperature and ionization filament power. The experimental results show that the number of cesium atoms can be kept stable by controlling the ionization environment temperature, and the ionization efficiency of cesium ion is greatly affected by the ionization environment temperature and the ionization filament power. When other working conditions remain unchanged, the ionization efficiency reaches the maximum when the ionization filament power Q_c is 2.818 W; when the ionization environment temperature T_c is 110 °C, the ionization process is stable and the

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发重点专项(No.2016YFF0100400), 国防基础科研计划(No.JCKY2018208B016)

第一作者: 王叶萍(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电成像器件测试技术. Email: 1012531812@qq.com

导师(通讯作者): 钱芸生(1968—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电成像器件、系统与相关测试技术. Email: yshqian@njust.edu.cn

收稿日期: 2020-06-22; 录用日期: 2020-09-15

<http://www.photon.ac.cn>

most sufficient, and the maximum output ion current is about 25 nA. The experimental results are in good agreement with the theoretical model. By controlling these factors, the incident intensity of cesium ion beam can be stably adjusted.

Key words: Photoelectric imaging device; Microchannel plate; Performance test; Ionization efficiency; Cesium ion incident source; Plasma

OCIS Codes: 230.0040; 020.2070; 040.5250; 130.1750; 260.3230

0 引言

微通道板(Microchannel Plate, MCP)是一种大面阵电子倍增探测器,由于离子入射物体表面从而引起二次发射的过程比较复杂^[1],现有的MCP性能测试技术大都以电子枪作为入射源.随着技术的不断发展,离子轰击产生二次电子有了越来越多的应用,比如在等离子显示器中常用离子作为激发源,轰击MgO表面,使其产生二次电子^[2];又如在铯原子钟的核心部件磁选态铯束管中,通过电子倍增器件将铯离子放大到伺服电路要求的电平^[3].磁选态铯束管是铯原子钟的核心部件,铯原子钟由于其可靠性高、准确度好及漂移率低,被用作一级频率标准^[4-5].但受制于电子倍增器寿命过短,国产铯钟在寿命、可靠性及长期稳定度方面表现尚不如意,中国航天科工二院二零三所的研究初步验证了将微通道板应用于铯原子钟可有效克服现有铯原子钟寿命短的问题^[6].与电子轰击引起的二次电子发射类似,离子轰击下的二次电子发射也受撞击能量的影响,离子能量受离化效率和初始出射方向的影响.目前,由于离子轰击引起的二次发射过程相对复杂,因此相关的研究较少,中国航天科工二院二零三所将微通道板用作铯信号放大研究^[6],验证了微通道板可将铯离子信号进行放大,但是对与入射铯离子的束强和稳定性并未做深入研究.兰州空间技术物理研究所和中国工程物理研究院均在离子轰击下的二次发射方面进行了深入研究^[4,15],但对入射离子的束强及稳定性也未作深入探究.而以电子枪作为入射源的微通道板性能测试系统要求保证输入电子源稳定均匀且大小可控^[7-8],因此,若要使用铯离子作入射源则要考虑铯离子源的稳定性及可控性.在研究铯离子作为MCP性能测试入射源时,考虑到铯离子离化效率的大小对铯离子束强度具有决定性影响,因此在研究离子轰击引起的二次发射前需要确定离化效率的影响因素,本文对MCP测试用铯离子源离化效率进行研究,利用金属收集极替代MCP,以测出离子输入电流.通过观察离子输入电流的变化来研究并确定离化效率的影响因素.金属脱出功的大小对铯原子离化效率有很大的影响^[9].钽的脱出功为4.12 eV,离化程度相对较高,且硬度适中,富有延展性,因此本文用钽丝作为离化丝研究铯离子离化效率影响因素,为研究基于铯离子入射源的MCP性能测试技术打下基础.

1 实验装置与基本原理

1.1 实验装置

目前,具有实际应用价值的热离子能量转换器的结构形式是充铯的工作在电弧工况的热离子二极管^[10],其电极对一般由熔点较高的金属制成,通过给发射极通电加热,到一定的高温($\sim 1\ 500\ ^\circ\text{C}$)时将发生热电子发射,铯蒸气充入电极间隙并在其中电离形成等离子体,电子输运通过等离子体区域后到达接收极,经外电路的负载做功后重新回到发射极,形成回路^[11-12].本文所采用的铯离子发生器借鉴热离子能量转换器的工作原理,其结构如图1所示,铯离子束产生器由递推杆、铯泡、波纹管、离化丝(采用钽作为热离化金属丝)、热敏电阻、吸铯剂、磁钢等组成.

其工作过程如下:进行实验时,推动递推杆使之挤压并击碎铯泡,铯泡破裂后铯原子溢出,并进入波纹管;波纹管上绕有加热丝,通过加大加热丝的电流使铯固体受热气化;气化后的铯原子通过管道向离化丝运动;此时给离化丝两端通以电流,离化丝所加功率越大温度越高,当离化丝被加热到一定程度时产生热电子发射,运动到离化丝附近的铯蒸气与电子碰撞发生电离从而形成铯等离子体.热敏电阻用来检测离化环境的温度,离化丝前端的吸铯剂(石墨)用以吸附无用的杂散铯原子及其他的杂质原子,此外,在离化丝附近装有磁钢,前端有一个聚焦极,给聚焦极加一定的电压,电子被聚焦极吸收,铯离子在聚焦电场的作用下来回运动,磁钢产生的偏转磁场改变铯离子运动方向使之从小孔射出,打在收集极上.通过测试收集极电流便可进行离子流检测.

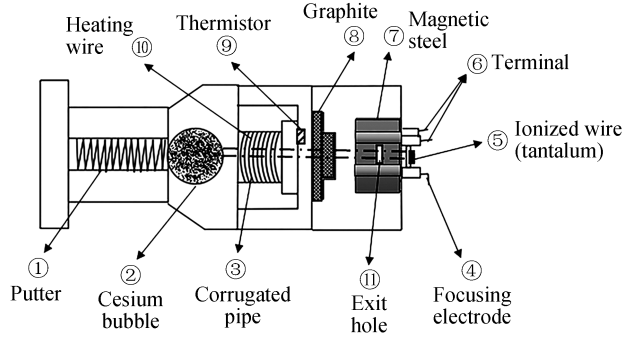


图 1 铯离子束产生器结构
Fig. 1 Structure of cesium ion beam generator

1.2 基本原理

离化率是表征等离子体特征的一个重要参数,离化率是指被电离原子占全部入射原子的百分比.一般情况下,离化率通常有两种表现形式^[12-14]:一种是表示入射粒子被离化的程度,即电荷有效性,用粒子密度的比值来表示,即

$$\eta = \frac{S_j}{(S_j + S_n)} \quad (1)$$

式中, S_j 为溅射出的离子的密度, S_n 为溅射出的中性原子的密度.

另一种是用基片的金属离子的通量与金属离子和中性原子的通量之和的比值表示,即

$$\eta = \frac{T_i}{(T_i + T_n)} \quad (2)$$

式中, T_i 为基片的金属离子的通量, T_n 为溅射出的中性原子的通量.

前者通常用来分析离化区的离化率,而后者多用于计算基片附近的离化率.本文研究为铯离子轰击MCP的性能测试入射源前端研究,目的在于深入了解铯离子入射源的大小控制及稳定性研究.铯离子由铯原子轰击离化丝并受热离化而产生,过程中受到多种因素的影响.故以式(2)为基础,研究离化丝附近的离化率影响因素.当铯原子打到灼热钽丝表面时,一部分原子会以正离子(或负离子)的状态飞离金属表面.利用该现象,只要知道每秒落到金属丝上的原子数,测出离子电流就可以得到离化效率.

若 V 为被检测原子的电离电位(单位为伏特), φ 为检测金属丝的脱出功,则某时刻飞离金属表面的离子数 n^+ 与同一时刻飞离同一表面的中性原子数 n^0 之比由沙哈-朗缪尔(Saha-Langmuir)方程给出:

$$\frac{n^+}{n^0} = e^{\frac{e(\varphi - V)}{KT}} \quad (3)$$

本文的铯离子束产生装置利用加热丝对离化环境进行加热,铯泡中的铯原子在铯泡被击破后,受热气化并通过管道打在灼热离化丝上发生离化效应.气化后到达离化丝的铯原子数即为到达金属基片入射原子的通量,由式(2)可知离化效率为离化后的铯离子数和到达离化丝的铯原子数之比.铯原子数无法以一种很好的方式进行测量,经分析可知某时刻到达离化丝的铯原子数等于飞离表面的离子束和中性原子束之和,因此只要知道其中任意两个量便可求出相应的离化效率,而沙哈-朗缪尔方程给出了某时刻飞离金属表面的离子数与同一时刻飞离同一表面的中性原子数之比,该值由被检测原子的电离电位和离化金属丝的脱出功决定,由此使用沙哈-朗缪尔方程可推导得出本装置中铯离子的离化效率.结合式(2)和式(3)可定义离化效率 η 为 n^+ 与入射原子数之比,由此可得

$$\eta = \frac{n^+}{n} = \frac{1}{1 + \frac{n^0}{n^+}} = \left[1 + e^{\frac{-e(\varphi - V)}{KT}} \right]^{-1} \quad (4)$$

根据沙哈-朗缪尔(Saha-Langmuir)方程可知,如 $\varphi > V$,且 $e(\varphi - V) \gg kT$,则几乎全部原子均被电离.铯、钾、铷的电离电位分别为 3.87 eV、4.16 eV 及 4.32 eV.而钨的脱出功高达 4.52 eV,所以不仅可用来离化检测铯,也可检测铷及钾,但钨丝必须很纯,尤其不能含钍,否则脱出功降至 2.6 eV 时,就失去表面电离能

力^[9]. 钽的脱出功 4.12 eV, 因此, 钽是一种很好的离化检测铯的金属. 钽主要存在于钽铁矿中, 硬度适中, 富有延展性, 可以拉成细丝制成薄箔, 其热膨胀系数很小.

再者, 单从入射原子来看, 为保证铯原子能从铯炉运动到离化丝上, 波纹管内部开有很小的圆形管道控制铯原子的运动范围. 从管道每秒向各个方向扩散出来的原子数 n 为

$$n = \frac{1}{4} N \bar{v} A_s = \frac{1}{4} \frac{P}{KT} \sqrt{\frac{8KT}{m}} A_s \quad (5)$$

式中, N 为气室内单位体积中原子数; \bar{v} 为铯原子平均速率 (cm/s); A_s 为管孔面积 (cm²); P 为铯炉内的饱和蒸气压 (Pa); T 为铯原子温度 (K) ($T=280\sim 1\ 000$ K); m 为一个铯原子质量 ($m=2.22\times 10^{-22}$ g); K 为玻尔兹曼常数.

金属蒸气的气压取决于一定温度下的饱和蒸气压, 在热平衡条件下铯的饱和蒸气压与温度的关系^[9]为

$$\log(P) = -\frac{4075}{T} + 11.38 - 1.45\log(T) \quad (6)$$

又 $P = nKT$, 故已知温度求得饱和蒸气压后, 便可求出铯原子的密度, 进而求出铯原子数.

由式(5)、(6)可知, 从铯泡出来的铯原子总数受压强、铯原子温度以及管孔面积的影响. 根据整个测试系统需求, 管孔面积受装置限制保持固定. 而铯原子温度由加热丝温度决定, 管内蒸气压由整个真空室真空度决定; 进而可知管孔中铯原子总数受加热丝温度和气室压强影响. 又由电流强度式

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{nq}{t} \quad (7)$$

易知, 单位时间内出射离子数 n^+ 为

$$n^+ = \frac{I}{q} \quad (8)$$

结合式(4)、(5)、(6)、(8)可得离化率为

$$\eta = \frac{n^+}{n} = \frac{1}{4} \frac{P}{KT} \sqrt{\frac{8KT}{m}} A_s \frac{I}{q} \quad (9)$$

由式(9)可知, 在热平衡条件下, 离化效率与离子电流成正比, 综上可知, 离化率的影响因素主要有压强、离化环境温度、离化丝功率等.

与电子轰击引起的二次电子发射类似, 离子轰击下产生二次发射的机制包括势能型 (potential 型) 发射和动能型 (kinetic 型) 发射^[2], 其二次电子发射也受离子撞击能量和撞击角度的影响. 当入射离子轰击能量低时, 二次电子基于俄歇中和理论产生势能型发射. 势能型发射由离子与固体的相对能级构造引起, 不存在入射粒子的动能转换. 而当高能离子轰击固体时, 与固体产生非弹性碰撞引起的二次电子发射即为动能型发射. 聚焦电压将保证铯离子束垂直打在金属收集极上, 从而获得离子输入电流. 结合本实验结构及实验目的, 将聚焦极电压也纳入影响因素之一, 通过实验测试聚焦电压对输出离子电流的影响. 由式(9)可知输出量 (收集电流的变化) 即可表征离化率的变化. 为便于研究, 本文将设计相应实验对上述因素对收集电流的影响进行研究.

2 实验方法与结果分析

2.1 微电流测量装置

本研究为微通道板测试用铯离子源离化效率研究, 考虑到后续研究 MCP 输入输出极、阳极等工作条件需要高压控制, 因此将微电流计集成高压控制模块部件. 在离子出射口 5 mm 装有金属收集极, 通过运放反馈电流法对电流信号进行测量. 实验中, 离子电流比较小, 一般的电流计无法测量微小信号. 本研究所测试离子电流大小在 pA 量级, 需要准确度在 1 pA 级的微电流计. 对于 pA 级电流测量, 无法直接测量电流信号, 需要对信号进行 $I-U$ 转换, 同时由于信号较为微弱, 需要先对信号进行放大, 在放大转换过程中, 运算放大器的失调电压和偏置电流等信号会产生干扰. 同时工频干扰、噪声、电路失调等杂质信号也被放大. 所以采用 AD210 隔离放大器对干扰信号进行过滤、去除. 然后再对该放大信号进行采集, 通过处理算法对信号进行拟合、标定, 最后测出相应电流.

具体的标定方法如下:用标准电压源给予微电流计一定的激励,并记录激励电压值的大小;再通过微电流计测得AD器件对电压信号进行采样以及模数转换后的数字信号.根据测试要求及设计电路等效阻值不断改变激励电压值,并记录相应的数字信号结果.最终可得到模拟电压和AD器件转换后数字信号的对应关系表,再基于设计电路得到电压电流的转换关系进而得出对应电流值.改变测试间隔以获得大量对应数据,利用数学方法对数据进行拟合、实现标定.为了保证测试结果的准确度,微电流计所选印刷电路板的表面以及体内的漏电流要远小于1 pA,绝缘性能好,且对表面严格清洁防潮.此外,测试过程中,采用绝缘性能好的接线柱,避免产生静电干扰从而影响测试结果.

2.2 实验设计

如图2所示,整个测试装置有七根导线引出,包括热敏电阻、离化丝的两极、加热丝的两极、聚焦极和设备地端共7个接口.给加热丝加以恒定电流可改变离化丝环境温度,测量热敏电阻的阻值得到相应的温度值.改变离化丝两端的电压和电流可改变离化丝的功率.离子输出电流使用2.1节中所述微电流计进行测量.

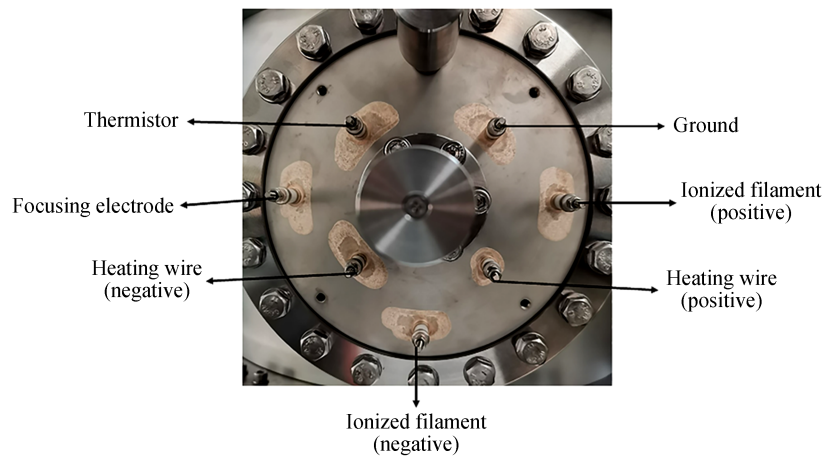


图2 测试接线图
Fig.2 Test wiring diagram

给加热丝施加可调节的电流,电流越高则离化环境温度越高,通过热敏电阻可以检测当前环境温度;在铯离子出射口处设有收集极,利用微电流计可检测离子电流的大小;本测试保持铯源大小恒定,通过测量收集电流的大小可得出离化率受相应因素的影响.

实验1:保持离化丝两端电压、电流以及聚焦极电压大小恒定,根据实验经验,选定离化丝电流3.064 A,离化丝电压1.4 V,聚焦电压12 V,在该测试条件下,实验现象较为明显;通过改变加热丝电流的大小来改变离化环境温度,离化环境温度通过热敏电阻测量,同时测量收集极电流的大小和热敏电阻的阻值.通过热敏电阻阻值随温度对应关系,得到测试结果如图3.

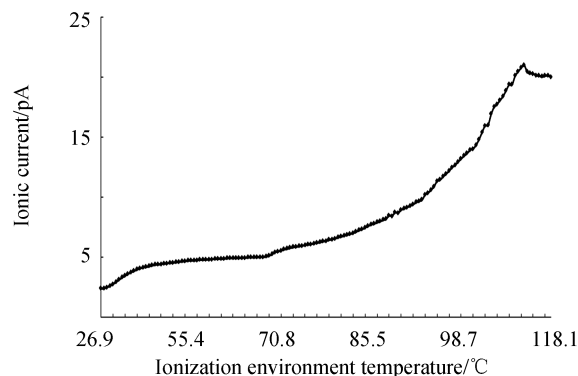


图3 离子电流随离化环境温度变化曲线
Fig.3 The curve of ion current with thermistor resistance

由图3可知,离化环境温度越高,离子电流越大,相应的离化效率也越高,但是当温度上升到110℃左右时,离子电流达到最大值,此时离化效率最高.当温度继续升高,离子电流不会再升高并趋于稳定,说明此时已达到热平衡状态.

实验2:根据实验1,将加热丝温度调到110℃,使铯原子入射数量保持稳定,聚焦电压继续保持在12V,将离化丝的电压保持在1V,通过改变离化丝的电流来改变离化丝的功率,并检测收集电流的大小,实验结果如图4.

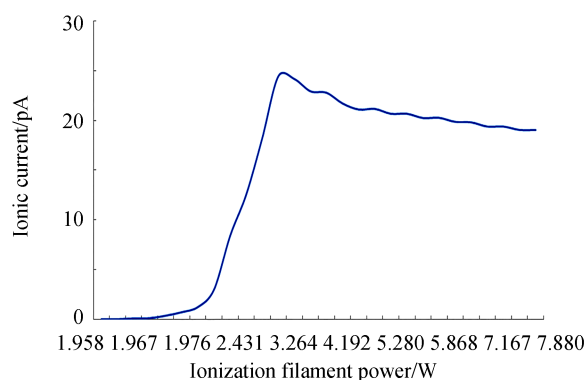


图4 离子电流随离化丝功率变化曲线

Fig.4 Ion current with ionizing filament power curve

由实验结果可知,离化丝功率存在一个临界值 $Q_c=2.818$ W,在临界值以上,功率越低,离子电流越高,入射铯原子处于热平衡状态,可视为固定入射值,因此对应的离化效率也越高,而当离化效率低于该临界值时,因表面吸附原子层使脱出功减小,所以离子电流会快速减小,随着离化丝功率降低,离化效率会急剧下降,正常工作功率必须选择高于 Q_c 以使其工作稳定,并有较快的响应.

实验3:上述实验采用实验参数最优值作为固定参数来对另一参数进行测试,为明确离化环境温度与离化丝功率两个参数之间不会互相影响,设计辅助交叉实验.

首先,针对实验1,保持离化丝两端电压、电流以及聚焦极电压(12V)恒定,通过改变加热丝电流的大小来改变离化环境温度,离化环境温度通过热敏电阻测量.在某一温度下分别设置离化丝功率为2.818W(实验2中最优值)、3.747W、4.298W,并测出相应的离子电流.得到测试结果如图5.

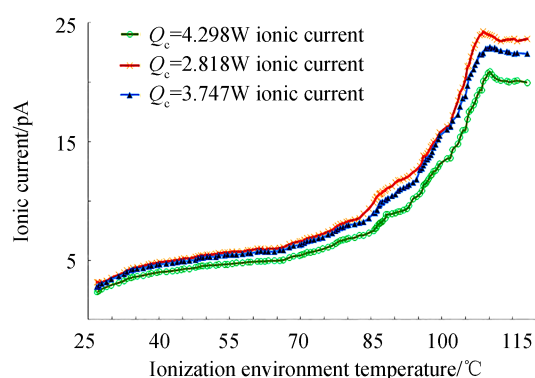


图5 不同离化丝功率下离子电流随离化环境温度变化曲线

Fig.5 Variation curve of ion current with ionization environment temperature under different ionization filament power

针对实验2,保持聚焦极电压12V恒定,保持离化丝电压为1V,改变离化丝电流以控制离化丝的功率,在某特定功率下调节离化环境温度分别为110℃、100℃、90℃,并测出对应条件下离子电流值.得到测试结果如图6.

由实验结果可知,离化环境温度与离化丝功率两个参数之间不互相影响.在不同离化丝功率条件下,离子电流随离化环境温度的变化趋势大致相同,并且离化丝功率大于最优值时离化环境温度对离子电流大小

影响较小.在不同离化环境温度下,离化丝功率对离子电流大小的影响趋势也变化不大,但相同离化丝功率之下离化丝环境温度对离子电流大小影响较大.

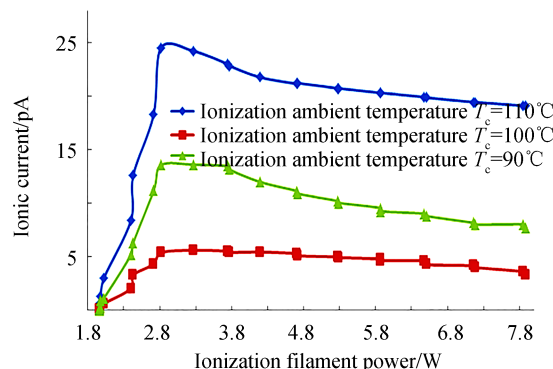


图6 不同离化温度离子电流随离化丝功率变化曲线

Fig.6 Variation curve of ion current with ionization filament power at different ionization temperature

实验4:根据实验3,将加热丝温度调到110℃,使铯原子入射数量保持稳定,并调节离化丝电流使其功率高于临界功率值后保持稳定,改变聚焦电压,实验结果如图7.

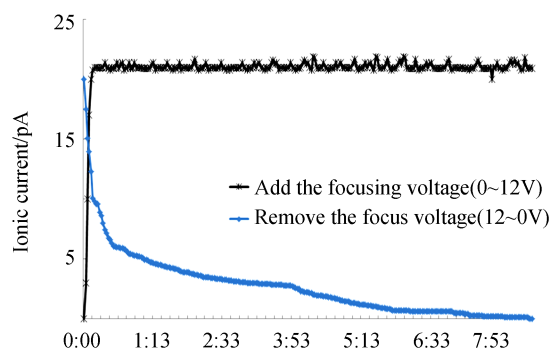


图7 离子电流随聚焦电压变化曲线

Fig.7 Ion current with the focus voltage change curve

当去掉12 V的聚焦电压时,前5 s收集电流会从20 pA左右迅速下降到10 pA左右,之后电流缓慢下降,经过大约10 min缓慢下降至0 pA左右,此时可知,无离子电流.当聚焦电压从0 V立即上升到12 V,在5 s内,电流迅速从0 pA左右上升到20 pA.由上述实验现象可知,聚焦电压只是将离化后的离子运动方向进行聚焦,从而影响离子输出电流,对离化效率并无影响.由于聚焦电压的作用在于固定离子运动方向,实验1~3中使用的聚焦电压定值对其他参数及实验结果无影响.

2.3 结果与分析

在测试MCP性能参数时,输入电流的大小和稳定性对测试起到了决定性的作用,而输入电流受离化率的影响.通过实验研究可知,聚焦电压保证了铯离子束输出方向的固定,使其能有效地打在MCP入射面上,对铯离子的离化效率并无影响,而离化环境温度和离化丝功率是影响铯离子离化效率最重要的两个因素,决定了最终入射铯离子束强度的大小.结合式(5)、(6)及实验1可知,当离化环境温度越高,铯泡中铯原子运动速率越高,越多的铯原子具有足够的能量碰撞钨丝而离化成铯离子,随着温度不断升高,铯原子运动达到热平衡状态,离化的铯原子数不再增加,离化效率不再增加.

根据沙哈-朗缪尔(Saha-Langmuir)方程可知,在理想情况下,离化丝的温度越低,则离化效率越高.但实际情况下,当温度降低到某一临界值 T_c 时,因表面吸附原子层使脱出功减小,所以离化效率会急剧变低.由焦耳定律可知,离化丝温度和离化丝的功率成正比,由此可知离化丝功率是离化效率一个重要的影响因素.相应的离化丝功率存在一个临界值 $Q_c=2.818$ W,在临界值以上,功率越低,离子电流越高,入射铯原子处于热平衡状态,可视为固定入射值,因此对应的离化效率也越高,而当离化效率低于该临界值时,因表面

吸附原子层使脱出功减小,所以离子电流会快速变小,离化效率会急剧变低,正常工作功率必须高于 Q_c 以使其工作稳定,并有较快的响应.

3 结论

本文基于沙哈-朗缪尔(Saha-Langmuir)方程,通过设计一系列实验,并采用运放反馈电流法测试微弱离子电流,实验结果表明:作为MCP性能测试的入射源,要求入射铯离子束稳定可调,离子束的大小受离化效率的影响,聚焦电压保证了铯离子束输出方向的固定,离化环境温度和离化丝功率决定了入射铯离子束强度的大小.当离化环境温度越高,铯泡中铯原子运动速率越高,越多的铯原子具有足够的能量碰撞钽丝而离化成铯离子,随着温度不断升高,铯原子运动达到热平衡状态.而离化丝功率存在一个临界值,在临界值以上,功率越低,离子电流越高,而当离化效率低于该临界值时,因表面吸附原子层使脱出功减小,所以离子电流会快速变小,离化效率会急剧变低,正常工作功率必须高于 Q_c 以使其工作稳定,并有较快的响应.综上所述可知,铯离子作为MCP性能测试入射源可通过控制离化丝功率、离化环境温度来控制入射铯离子束束强.考虑到离子轰击下二次电子发射存在的撞击能量和角度的影响,在通过控制离化丝功率、离化环境温度保证铯离子束强度的同时,通过聚焦电压保证离子束能垂直打在MCP入射面,同时测试系统辅以一个平行电场的加速,保证入射离子有足够的能量进行轰击产生二次电子发射.

参考文献

- [1] CHEN Xin, CHEN Chun-hua, WANG You-xiang. Study of secondary ion emission from GaAs under O_2^+ and Cs^+ ion bombardment[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, **16**(2): 125-132.
陈新, 陈春华, 王佑祥. 砷化镓在 O_2^+ 与 Cs^+ 离子轰击下二次离子发射的研究[J]. 半导体学报, 1995, **16**(2): 125-132
- [2] LI Ya-juan, CHEN Xue-kang, WANG Ji, et al. Research of ion-induced secondary electron emission from MgO film[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2013, **19**(3): 135-140.
李雅娟, 陈学康, 王骥, 等. 离子轰击MgO薄膜二次电子发射的研究[J]. 真空与低温, 2013, **19**(3): 135-140.
- [3] 张忠山. 芯片级铯原子钟关键技术研究[D]. 苏州: 苏州大学电子信息学院, 2016.
- [4] VANIER J, AUDOIN C. The classical caesium beam frequency standard: fifty years later[J]. *Metrologia*, 2005, **42**(3): 31-42.
- [5] THOMAS C. Impact of new clock technologies on the stability and accuracy of the international atomic time TAI[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics & Frequency Control*, 1997, **44**(3): 693-700.
- [6] 王一非, 王运佳, 刘国栋, 等. 长寿命MCP电子倍增器铯信号放大性能研究[C]. 第十一届中国卫星导航年会论文集. 2020, 99-103.
- [7] GU Yun-ting, LIN Yan-jian, YAN Bao-jun, et al. Design of new electron gun capable of generating uniform electron-beam with large width[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, **39**(12): 1109-1113.
顾运厅, 林焱剑, 闫保军, 等. 产生大面积均匀面电子源的电子枪设计[J]. 真空科学与技术学报, 2019, **39**(12): 1109-1113.
- [8] LI Xiao-feng, LI Ting-tao, ZENG Jin-neng, et al. Study on the improvement of input signal utilization of MCP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3): 0325002.
李晓峰, 李廷涛, 曾进能, 等. 微通道板输入信号利用率提高研究[J]. 光子学报, 2020, **49**(3): 0325002.
- [9] 王义遒, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [10] HATSOPOULOSGN, GYFTOPOULOSE P. Thermionic energy conversion. volume I. processes and devices [M]. USA: The MIT Press, 1973.
- [11] ZHONG Wu-yue, LU Zheng, ZHENG Jian-ping, et al. Distribution of electron potential energy of ignited cesium thermionic energy converter[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, **53**(11): 2223-2232.
钟武焯, 吕征, 郑剑平, 等. 热离子能量转换器铯电弧工况下电子势能的分布特性[J]. 原子能科学与技术, 2019, **53**(11): 2223-2225.
- [12] KUBART T, CADA M, LUNDIN D, et al. Investigation of ionized metal flux fraction in HiPIMS discharges with Ti and Ni targets[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, **238**(3): 152-157.
- [13] BOHLMARK J, ALAMI J, CHRISTOU C, et al. Ionization of sputtered metals in high power pulsed magnetron sputtering[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2005, **23**(1): 18-19.
- [14] GUDMUNDSSON J T. The high power impulse magnetron sputtering discharge as an ionized physical vapor deposition tool[J]. *Vacuum*, 2010, **84**(12): 1360-1364.
- [15] WANG Xiao-hu, YANG Zhen, ZHANG Lin-wen, et al. An ion beam profiler based on secondary electron emission[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(8): 2121-2124.
王小胡, 杨振, 章林文, 等. 基于二次电子发射的离子束剖面测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(8): 2121-2124.

Foundation item: Key Projects for the Development of National Major Scientific Instruments and Equipment (No. 2016YFF0100400), Defense Industrial Technology Development Program(No. JCKY2018208B016)