

# 一种基于金阴极 MCP 的冷阴极电子源的研制

姚文静<sup>1</sup>, 刘术林<sup>2,3</sup>, 闫保军<sup>2</sup>, 张斌婷<sup>2,4</sup>, 韦雯露<sup>2,4</sup>, 彭华兴<sup>2,4</sup>, 杨玉真<sup>5</sup>

(1. 河南大学物理与电子学院, 河南 开封 475004; 2. 中国科学院高能物理研究所  
核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049; 3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;  
4. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049; 5. 上海中医药大学针灸推拿学院, 上海 201203)

**摘要:**采用深紫外光子激发金阴极产生的冷阴极电子源具有诸多优点, 将其应用于电子轰击离子源(EI)有助于获得高质量的离子源。本实验分别采用在 JGS2 石英玻璃上蒸镀金薄膜构成透射式金阴极、在微通道板(MCP)输入面蒸镀金薄膜构成反射式金阴极, 将二者以不同的组合方式装配在一起, 通过施加不同的间隙电压, 从而获得较大范围的电子流输出, 研制出电子束流可调( $10^{-11} \sim 10^{-5}$  A)、均匀分布(非均匀度 6.5%)的稳定输出(稳定工作时间大于 5 h)电子源, 有望在高质量 EI 源中得到推广和应用。

**关键词:**电子源; 深紫外; 金阴极; 微通道板(MCP); 电子束流

中图分类号: O657.63; O462.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2023)01-0096-09

doi: 10.7538/zpxb.2022.0004

## Development of a Cold Cathode Electron Source Based on Gold Cathode MCP

YAO Wen-jing<sup>1</sup>, LIU Shu-lin<sup>2,3</sup>, YAN Bao-jun<sup>2</sup>, ZHANG Bin-ting<sup>2,4</sup>,  
WEI Wen-lu<sup>2,4</sup>, PENG Hua-xing<sup>2,4</sup>, YANG Yu-zhen<sup>5</sup>

(1. School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, China;  
2. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, CAS,  
Beijing 100049, China; 3. School of Nuclear Sciences and Technology, University of Chinese Academy  
of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy  
of Sciences, Beijing 100049, China; 5. School of Acupuncture-Moxibustion and Tuina,  
Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China)

**Abstract:** In this study, cold cathode electron sources using deep-UV photons to excite gold cathode and microchannel plate (MCP) were employed to configure a high-quality electron impact ion source (EI) in a mass spectrometry. As an electron multiplying device, MCP can amplify weak signal by thousands of times. Gold was used as a photo-cathode and it had the characteristics of simple excitation, stable photoemission, and uniform photocurrent density distribution. Combining the characteristics of the two, a series of research were carried out. The gold cathode JGS2 was formed by evaporation gold film on JGS2 quartz glass, and the gold-cathode MCP was formed by evaporation

gold film on the input surface of MCP, respectively. The two were assembled in different combinations to develop two kinds of cold cathode electronic sources. Firstly, the deep-UV excited gold cathode MCP was used as the electron source, the output electron beam current range was  $10^{-11}$ - $10^{-6}$  A. When the excitation light source was stable, the electron source could reach a stable state quickly and maintain a stable output for a long time ( $>5$  h). Under the interaction of gold cathode MCP and gold cathode JGS2, the maximum output electron beam current of electron source could reach  $10^{-5}$  A. At the same time, the contributions of reflected photoelectrons and transmitted photoelectrons generated by the gold cathode to the output current under different electric fields were discussed, as for the deeper working mechanism to be solved. In addition, the output electron beam current could be continuously adjusted by changing the working voltage of MCP, so that the cold cathode electron source could be flexibly and quickly adjusted and responded within a certain range. Finally, a fluorescent screen was used to observe the imaging quality of the output current generated by the above system, and the RGB image captured by the high-definition camera was converted into a grayscale image, and the non-uniformity of the image was calculated to be about 6.5%. Therefore, the imaging uniformity of the cold cathode electron source developed in this paper on the phosphor screen was good. The above results showed that the cold cathode electron source composed of gold cathode MCP excited or combined with gold cathode JGS2 by deep ultraviolet light had the characteristics of long working stability, good uniformity, wide and continuously adjustable beam current range. It can realize the functions of photoelectric conversion and electron multiplication, and is expected to provide a new alternative for the development of electron sources in EI sources in the future.

**Key words:** electron source; deep UV; gold cathode; microchannel plate (MCP); electron beam

电子轰击离子源(EI)是质谱仪中常用的离子源之一,主要由电离盒、灯丝、离子聚焦透镜和1对磁极组成,其工作原理是由灯丝发射电子,经聚焦并在磁场作用下穿过电离盒到达收集极,此时进入离子化室的样品分子在一定能量电子的作用下发生电离,离子被加速聚焦成离子束进入质量分析器。离子源的性能直接影响质谱仪的灵敏度,除了要求离子源工艺性能好、使用寿命长、价格低廉外,还要求离子束流强大、散射角小、稳定、能量分散和质量歧视小<sup>[1]</sup>。由于电子轰击样品分子使其电离的效率(即电离效率)直接影响质谱仪的灵敏度,因此为了设计性能优良的离子源,对激发样品产生离子的电子源也有一定要求,增加灯丝电流使其产生密度更大的电子束是提高EI电离效率最直接的方法。然而,传统EI源电子束流是随着灯丝电流的增大而增大,当电子束流增大

到一定程度时,其产生的空间电荷效应会改变离子在EI内的运动状态,从而影响质谱仪的灵敏度。即当激发离子化的电子束流增加导致空间电荷效应时,会使不同质量数的离子传输效率不同,给EI带来歧视效应<sup>[2]</sup>。

传统的热阴极电子源具有价格便宜、安装方便、发射功率大、电流密度可调等优点,但其稳定性,特别是快速启动状态下的稳定性以及均匀性不如采用光电效应原理制成的冷阴极电子源。Photonis公司的Laprade等<sup>[3]</sup>报道过冷阴极电子源的特点,由1~3块微通道板(MCP)组成的形状和尺寸大小不等且均匀分布的面电子源,可以实现均匀性优于90%、电子束流密度连续可调且最大束流密度达 $50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的电子源。钱芸生等<sup>[4]</sup>使用紫外光源、栅网和其他零部件组合提供均匀光源,采用金阴极作为光电转换部件,MCP作为电子倍增器件,通过

改变 MCP 电压来调节电流密度大小,由此获得束流密度可调的均匀分布电子源。Kim 等<sup>[6]</sup>为便携式质谱仪设计了一款 EI 电子源,即采用紫外发光二极管激发 MCP 产生并放大光子,再用第 2 块 MCP 继续倍增来自第 1 块 MCP 的电子,从而获得理想的冷阴极电子源。

本研究在 MCP 输入面上蒸镀金薄膜作为金阴极 MCP,利用金阴极的光电转换功能将盘型低压汞灯发射的深紫外光子(峰值波长 253 nm)转化成电子,再经 MCP 倍增后,实现均匀分布的电子源。另外,通过在 JGS2 石英玻璃的一侧蒸镀合适厚度的金薄膜作为金阴极 JGS2,并将金阴极 JGS2 和金阴极 MCP 组合,最大限度地提高深紫外光子的转换效率,进一步提高电子源输出电流的大小。

## 1 金阴极以及深紫外光源

金的电子逸出功为 4.9 eV<sup>[6]</sup>,理论上光子能量大于 4.9 eV(波长小于或等于 254 nm)可以激发其产生光电子。金在软 X 射线到深紫外波段<sup>[7-10]</sup>具有较高的量子效率,甚至可以延伸到 340 nm<sup>[11]</sup>。由金薄膜制作的光电阴极即

使暴露在大气中,其光电发射特性仍保持不变,同时具有激发方式简单、光电发射稳定以及发射的光电流密度分布均匀等特点。本文测量了金阴极 JGS2 在波长 253 nm 左右的光子透过率约为 24%,示于图 1。

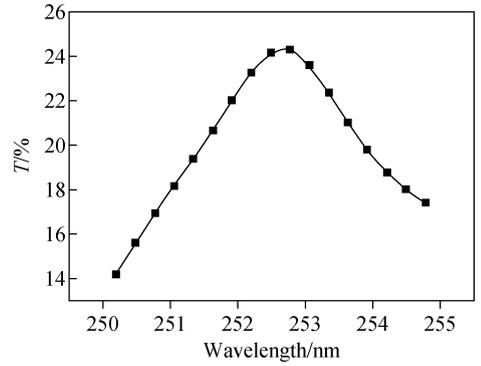


图 1 金阴极 JGS2 的透过率曲线

Fig. 1 Transmittance curve of JGS2 gold cathode

可以采用深紫外发光二极管或者盘香型低压汞灯激发金阴极的光源,本实验采用低压汞灯的实物及其发光光谱示于图 2。由图可知,在波长约 253 nm 处有 1 个特征峰,将其作为激发光

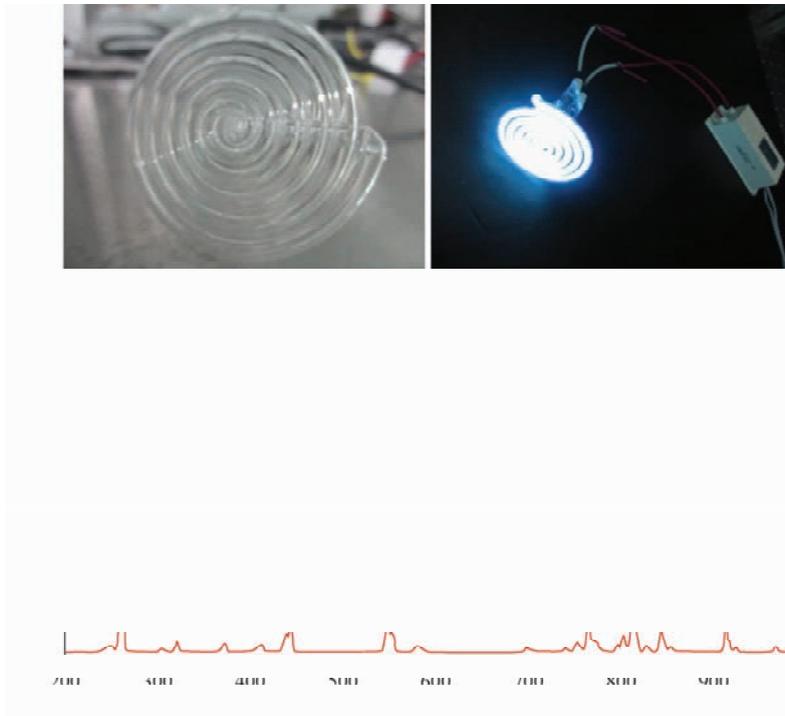


图 2 低压汞灯及其发射光谱

Fig. 2 Low pressure mercury lamp and its emission spectrum

源能够使金阴极的量子效率达到预期要求。

除此之外,激发光源的稳定性直接影响金阴极产生光电子的稳定性。作为气体放电灯的盘型低压汞灯,其稳定性主要由驱动电源——镇流器来决定。在镇流器的驱动下,低压汞灯连续工作 13 h,输出光功率随时间的稳定性示于图 3。利用光功率计测得输出功率的波动范围小于 3.8%,可见,由低压汞灯和驱动电源构成的深紫外光源可以作为激发金阴极产生稳定光电子的稳定光源。

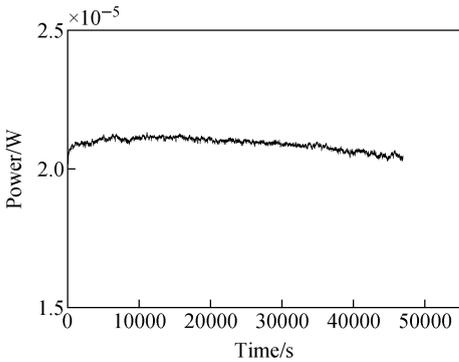


图 3 低压汞灯输出光功率随时间的稳定性  
Fig. 3 Stability of output optical power of low pressure mercury lamp over time

当激发光源激发金阴极时,金阴极 JGS2 的光电子出射方向与光子入射方向一致,将其称为透射式金阴极;金阴极 MCP 的输入面直接面对入射光子,光电子的出射方向与光子的入射方向不一致,将其定义为反射式金阴极,二者的实物图示于图 4。本文采用的是有效直径为  $\Phi 50$  mm,体电阻为 80 M $\Omega$  的 MCP,在其输出面蒸镀常规的 Ni-Cr 电极,在 MCP 输入面

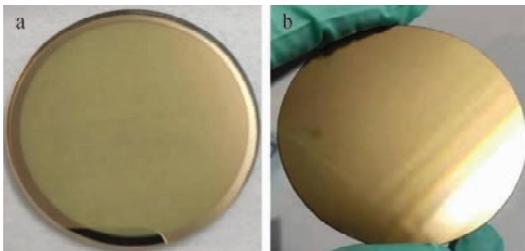


图 4 金阴极 JGS2(a)和金阴极 MCP(b)的实物图  
Fig. 4 Physical diagrams of the gold cathode JGS2 (a) and the gold cathode MCP (b)

先后蒸镀约 60 nm Cu 薄膜、100 nm Au 薄膜,将其作为电极的同时构成反射式金阴极。

## 2 实验装置与测试方法

金阴极 MCP 的测试原理示于图 5,系统真空度优于  $10^{-4}$  Pa。测试过程中,盘型低压汞灯发射的深紫外光子可以透过石英窗法兰照射到金阴极 MCP 的输入面,高压电源为 MCP 提供 200~1 000 V 的工作电压  $\Delta V$ ,荧光屏与 MCP 的输出面电位差为 300 V,Keithley 6485B 静电计一端接荧光屏,另一端接地,用来记录 MCP 的输出电流  $I_p$ 。

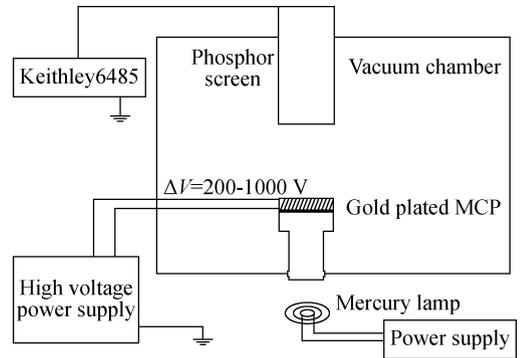
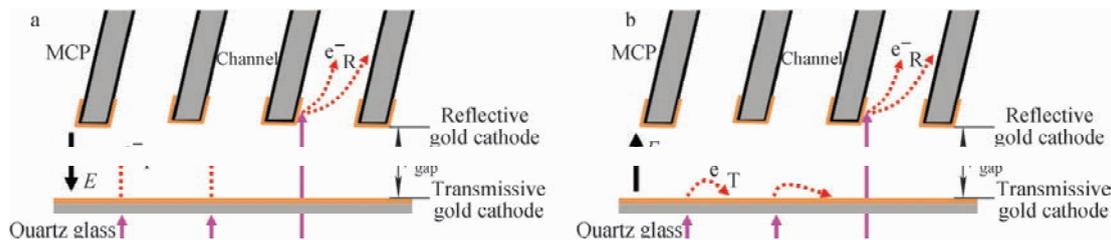


图 5 金阴极 MCP 测试原理图

Fig. 5 Schematic diagram of gold cathode MCP

金阴极 JGS2 与金阴极 MCP 组合测试的示意图示于图 6。二者之间通过加入陶瓷绝缘环形成间隙,使其能够施加间隙电压 ( $V_{gap}$ )。当  $V_{gap}$  为正电压时,MCP 的输入电流由 2 部分组成,第 1 部分来源于紫外光子激发金阴极 JGS2 产生的透射式光电子 ( $e^-_T$ );第 2 部分来源于紫外光子直接激发金阴极 MCP 输入面产生的反射式光电子 ( $e^-_R$ )。当  $V_{gap}$  为负电压时,由于反向电场的作用,金阴极 JGS2 产生的透射式光电子无法到达 MCP,MCP 输入电流来源于紫外光子直接激发金阴极 MCP 输入面产生的反射式光电子。因此,在  $V_{gap}$  为正电压的情况下,透射式光电子与反射式光电子共同作用激发 MCP 产生输出电流;在  $V_{gap}$  为负电压的情况下,只有紫外光子激发金阴极 MCP 输入面产生的反射式光电子对输出电流有贡献。



注: a. 正向间隙电压; b. 反向间隙电压

图 6 金阴极 JGS2 与金阴极 MCP 组合测试示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of gold cathode JGS2 and gold cathode MCP combination test

若将图 6 中的 MCP 反面放置, 可以作为常规 MCP 使用, 同样条件下, 测试其输出电流。由于 MCP 输出端蒸镀的是常规 Ni-Cr 电极, 其量子效率小于金阴极, 当  $V_{\text{gap}}$  为正电压时, 认为只有金阴极 JGS2 产生的透射式光电子为 MCP 提供输入电流。

### 3 测试结果的分析与讨论

#### 3.1 金阴极 MCP 的测试结果与分析

金阴极 MCP 的输出电流 ( $I_p$ ) 与工作电压 ( $\Delta V$ ) 的关系示于图 7。  $\Delta V$  在 200~1 000 V 时, 测得  $I_p$  为  $10^{-11} \sim 10^{-6}$  A, 该值除以 MCP 的有效面积, 对应的输出电流密度约为  $10^{-12} \sim 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>。因此, 通过调节 MCP 的工作电压, 可以制备出电子束流密度在较宽范围内连续可调的冷阴极电子源。

同时, 研究了上述电子源输出电流的稳定性, 综合反映深紫外光源以及 MCP 的工作稳定

性。在汞灯照射下, 金阴极 MCP 输出电流随时间的变化关系示于图 8 ( $\Delta V=300$  V, 约 5 h)。可知, 输出电流逐渐趋于稳定, 表明 MCP 在长期工作状态下的稳定性良好。由于 MCP 在 800 V 工作电压下的稳定性优于 300 V, 因此作为 EI 的电子激发源, 其稳定性优于热阴极。由于盘型低压汞灯的发光强度会随时间逐渐增强并存在一定范围的波动, 因此对输出电流的结果存在影响。此外, 静电计一端接地, 外界环境会干扰微弱电流, 出现图中所示的毛刺现象。

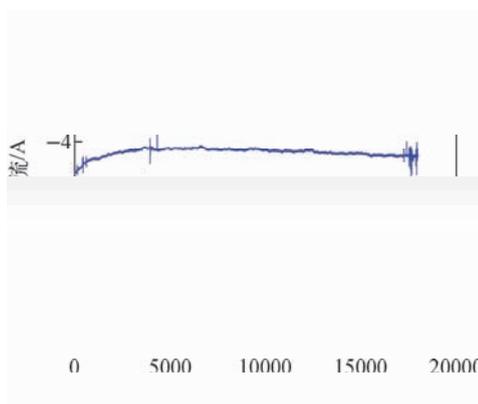


图 8 金阴极 MCP 输出电流的稳定性

Fig. 8 Stability of gold cathode MCP output current

金阴极 MCP 能够很快进入比较稳定的工作状态, 这与文献<sup>[3]</sup>报道的结果一致, 示于图 9。其中, 比较了冷阴极与热阴极电子源启动时的稳定性, 在开启瞬间, 由 MCP 构成的冷阴极电子源可以很快达到稳定状态, 而热阴极 (灯丝通电加热) 电子源在 4 min 后才能达到稳定状态。因此, 对于具有快速测试需求的质谱仪, 由 MCP 构成的冷阴极电子源具有显著优势。

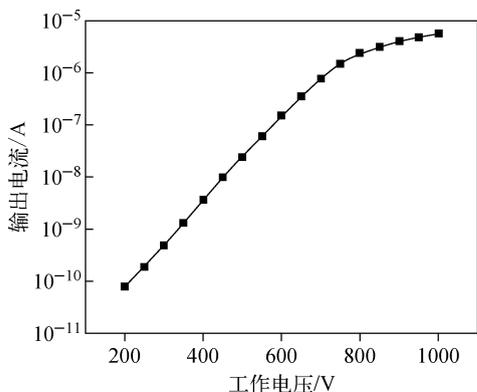


图 7 金阴极 MCP 的输出电流与工作电压的关系

Fig. 7 Relationship of output current of gold cathode MCP and working voltage



图9 冷阴极与热阴极电子源启动时稳定性的比较<sup>[3]</sup>

Fig. 9 Comparison of stability between cold cathode and hot cathode electron sources at startup<sup>[3]</sup>

为了进一步提高深紫外光源的稳定性,可以采用深紫外发光二极管,其稳定性通常优于低压汞灯。但目前深紫外发光二极管的光输出功率较小,其激发金阴极产生的光电子数也较少。若要获得更大的输出电流,可以在上述 MCP 后再增加 1 块大动态范围的 MCP,甚至可以在 2 个 MCP 之间加上正向电压,使在模拟状态下增益达  $10^6 \sim 10^7$  量级,输出电流达几十  $\mu\text{A}$ ,制成的激发电子源具有电子流密度精确可调、响应快速和稳定性好等特点。

### 3.2 金阴极 JGS2 与金阴极 MCP 组合的测试结果与分析

根据图 6 的测试原理得到不同间隙电压下金阴极 JGS2 与金阴极 MCP 共同作用的输出电流,结果示于图 10。当  $V_{\text{gap}}$  为 300 V 时,透射式光电子与反射式光电子共同作用激发 MCP 产生的  $I_p$  约为  $10^{-9} \sim 10^{-5}$  A;当  $V_{\text{gap}}$  为 -50 V 时,紫外光直接激发金阴极 MCP 产生的  $I_p$  约为  $10^{-11} \sim 10^{-6}$  A。

由图 10 可知,在输出电流达  $\mu\text{A}$  量级前, MCP 一直在线性区间内工作,即输出电流与输入电流呈线性关系,增益保持不变。在线性响应区间内,间隙电压 300 V 的曲线始终比间隙电压 -50 V 的曲线高将近 2 个数量级。在相同的工作电压下, MCP 的增益 (Gain) 不变,由 MCP 的增益表达式  $\text{Gain} = I_{\text{out}}/I_{\text{in}}$  ( $I_{\text{in}}$  和  $I_{\text{out}}$  分别表示 MCP 的输入电流和输出电流) 可知,输入电流越大,输出电流就越大。随着 MCP 工作电压的进一步增加, MCP 通道内壁导电层

无法及时补充电子至发射层,输出电流不再随输入电流呈线性增长,增益出现饱和特性,且表现出输入电流越大, MCP 越早出现饱和的现象<sup>[12]</sup>。

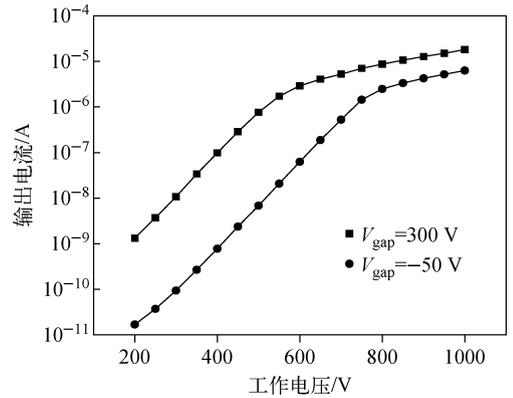


图10 不同间隙电压下,金阴极 JGS2 与金阴极 MCP 共同作用的输出电流

Fig. 10 Output currents of gold cathode JGS2 and gold cathode MCP under different gap voltages

在图 7 对应的结构中,接近 100% 的入射深紫外光子到达 MCP 输入面。而图 10 中,间隙电压为 -50 V 时,入射的深紫外光子经过金阴极 JGS2 后,一部分光子激发其产生透射式光电子,但在 -50 V 反向电压下,透射式光电子全部返回,无法到达金阴极 MCP 输入面;另一部分光子会透过金阴极 JGS2 (透过率约 24%) 到达金阴极 MCP 输入面,激发其产生反射式光电子,在 MCP 工作电压低于 700 V 时,反射式光电子经过 MCP 倍增后产生的输出电流为图 7 中数据的 1/5 ~ 1/2,工作电压高于 700 V 后, MCP 增益趋于饱和,两者逐渐相等。

### 3.3 金阴极 JGS2 与常规 MCP 组合的测试结果与分析

金阴极 JGS2 与常规 MCP 组合的测试结果示于图 11。当  $V_{\text{gap}}$  为 -50 V 时,紫外光激发常规 MCP 产生的  $I_p$  约为  $10^{-11} \sim 10^{-6}$  A,表明 Ni-Cr 电极对紫外光有一定的量子效率。与图 10 相比,在同一辐射通量的深紫外光子激发下,金阴极 MCP 产生的输出电流是常规 MCP 的 1.4 ~ 2.3 倍,即金作为光电阴极,其量子效率是 Ni-Cr 电极的 1.4 ~ 2.3 倍。通过优化

MCP 输入面蒸镀金薄膜的厚度、进入通道内的深度以及膜层的质量,可以进一步提高反射式金阴极对 MCP 输入电流的贡献。

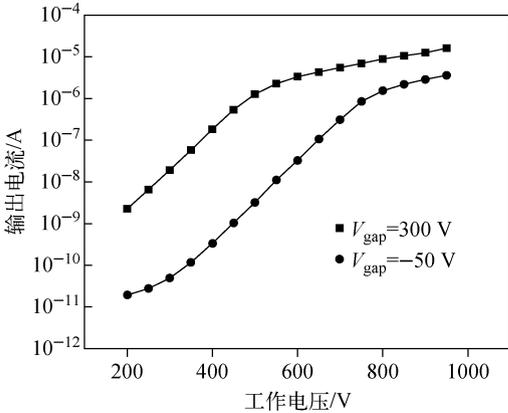


图 11 不同间隙电压下,金阴极 JGS2 与常规 MCP 组合的输出电流

Fig. 11 Output currents of gold cathode JGS2 and normal MCP under different gap voltages

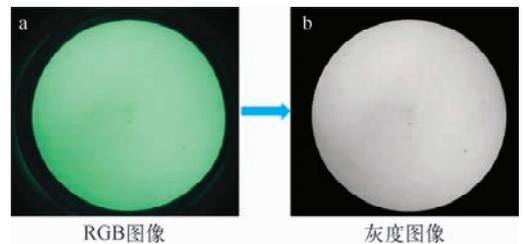
当  $V_{\text{gap}}$  为 300 V 时,透射式光电子激发常规 MCP 产生的  $I_p$  约为  $10^{-9} \sim 10^{-5}$  A。与图 10 相比,两者几乎趋于一致,表明在透射式光电子和反射式光电子共同作用(即混合模式)下,MCP 输入电流主要来源于透射式光电子。田景全等<sup>[9]</sup>利用深紫外光子照射金阴极 JGS2,测量 MCP 增益时发现,Ni-Cr 电极产生的反射式光电子的贡献为 2%~3%。因此,对输出电流起主要作用的是金阴极 JGS2 产生的透射式光电子,而反射式光电子的贡献可以忽略不计。

考虑到金属材料的二次电子发射现象,在 MCP 输入面内蒸镀金阴极,其二次电子发射系数最大值为 1.8,在 300 eV 下达到 1.7 左右<sup>[13]</sup>,而 Ni-Cr 电极的二次电子发射系数约 1.2。当 MCP 在混合模式下工作时,透射式光电子在正向间隙电压的作用下撞击金阴极 MCP 输入面产生二次电子,其数量是 Ni-Cr 电极的 1.5 倍。因此,混合模式下 MCP 输入面的金阴极产生的电子一部分来源于深紫外光激发的光电子,另一部分来自于透射式光电子激发该表面产生的二次电子,关于两者的具体贡献,将在后续的研究中开展。

MCP 输入面蒸镀金阴极有助于提高其在

短波范围内的量子效率。李晓峰等<sup>[14]</sup>研究了 MCP 在近紫外光的量子效率,结果显示,波长 254 nm 处的 MCP 量子效率为  $10^{-5}$  数量级。袁铮等<sup>[15]</sup>指出,不同的阴极量子效率会导致 MCP 能谱响应的差异,金作为光阴极时,金阴极 MCP 的量子效率在  $10^{-2}$  数量级。虽然该文章是关于 MCP 对软 X 射线能谱响应的研究,但深紫外光与软 X 射线能谱相近,可以为研究金阴极 MCP 对深紫外光的响应提供参考。

为了综合检验紫外光源、金阴极以及 MCP 整体的均匀性,将图 6 装置中 MCP 与荧光屏之间的电压增加到 4 000~6 000 V,在荧光屏中观察的图像示于图 12,图中的若干黑斑是由荧光屏制备工艺造成的,对结果造成的影响可以忽略。将 RGB 图像转换为灰度图像,以 25 个像素点为 1 组将灰度图像分为若干组,利用灰度值公式分别计算出每组的灰度平均值,利用每组的灰度平均值计算其相对应的标准差  $\sigma$ ,最后用  $\sigma$  除以 256(灰度值范围为 0~255,对应 256 个灰度级)来表示荧光屏成像的非均匀度<sup>[16]</sup>。经测量计算得出该图像对应的非均匀度约为 6.5%,说明本文研制的冷阴极电子源在荧光屏的成像均匀性良好。



注:a. RGB 图像;b. 灰度图像

图 12 荧光屏成像均匀性

Fig. 12 Image uniformity of fluorescent screen

## 4 结论

本研究利用 MCP 和金阴极研制了 2 种结构冷阴极电子源。首先采用深紫外光激发金阴极 MCP,输出的电子束流在  $10^{-11} \sim 10^{-6}$  A 范围内,当激发光源稳定后,该电子源很快达到稳定状态,并能够长时间( $>5$  h)保持稳定输出。在与金阴极 JGS2 的共同作用下,输出的电子束流最高可达  $10^{-5}$  A。通过改变 MCP 的工作电压,可以连续调节输出电子束流的大小。采

用荧光屏观测上述系统产生的输出电流成像质量,非均匀度约为 6.5%。综上,利用深紫外光激发金阴极 MCP 或者与金阴极 JGS2 组合作为冷阴极电子源,具有工作稳定时间长、均匀性良好、束流范围宽且连续可调的特点,能够实现光电转换和电子倍增于一体的功能,期望为 EI 源中电子源的研制提供备选方案。

### 参考文献:

- [1] AHN J R, PARK C J. Computer simulation of electron and ion trajectories in electron-impact ion sources of a quadrupole mass spectrometer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011, 645(1): 345-349.
- [2] 黄超,赵学珏,张建超,汪曦. 电子轰击源内空间电荷对其性能的影响[J]. 质谱学报,2011,32(2):71-76.  
HUANG Chao, ZHAO Xuehong, ZHANG Jianchao, WANG Yan. Influence of the space charge in electron impact ion source on its performance[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2011, 32(2): 71-76(in Chinese).
- [3] LAPRADE B, LANGEVIN F, STARCHER R. The development of a novel cold electron source [C]. 50th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Orlando, USA, 2002.
- [4] 钱芸生,汤狸明,赵慧明,宋诚鑫,张振,张益军. 一种大面积均匀面电子源:中国,CN107665798B [P]. 2019-05-07.
- [5] KIM H S, KIM S Y, YANG M. Cold electron source with an electron multiplier illuminated by ultraviolet photons[J]. Analytical Chemistry, 2012, 84(8): 3 635-3 639.
- [6] 王瑜英,高扬,王雪敏,曹柱荣,易早,徐习斌,易有根,吴卫东. 新型金阴极及其紫外光电发射特性[J]. 强激光与粒子束,2013,25(10):2 627-2 630.  
WANG Yuying, GAO Yang, WANG Xuemin, CAO Zhurong, YI Zao, XU Xibin, YI Yougen, WU Weidong. Fabrication and ultraviolet photoemission characteristics of novel Au photocathodes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2 627-2 630(in Chinese).
- [7] LOWENSTERN M E, HARDING E C, HUNTINGTON C M, VISCO A J, RATHORE G, DRAKE R P. Performance of Au transmission photocathode on a microchannel plate detector [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 10E912.
- [8] 吴奎,端木庆铎,姜德龙,王国政,高延军,李野. 金属 UV 光敏薄膜的实验研究[J]. 发光学报,2003(6):650-653.  
WU Kui, DUANMU Qingduo, JIANG Delong, WANG Guozheng, GAO Yanjun, LI Ye. Experimental study on metal UV photosensitive film [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2003(6): 650-653(in Chinese).
- [9] 田景全,朱宝仁,姜德龙,吴奎. 测量微通道板电子增益的紫外光电法[J]. 兵工学报,1987(2): 67-71.  
TIAN Jingquan, ZHU Baoren, JIANG Delong, WU Kui. UV photo electronic method for the measurement of MCP's gain[J]. Acta Armamentarii, 1987(2): 67-71(in Chinese).
- [10] 袁铮,刘慎业,肖沙里,曹柱荣,黎航,王丽伟. 金阴极微通道板能谱响应的理论研究[J]. 光子学报,2009,38(10):2 495-2 500.  
YUAN Zheng, LIU Shenye, XIAO Shali, CAO Zhurong, LI Hang, WANG Liwei. Study on the energy dependent response of microchannel plate with gold evaporated[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(10): 2 495-2 500(in Chinese).
- [11] 袁铮,刘慎业,曹柱荣,李云峰,陈韬,黎航,张海鹰,陈铭. 金阴极的选择性光电效应[J]. 物理学报,2010,59(7):4 967-4 971.  
YUAN Zheng, LIU Shenye, CAO Zhurong, LI Yunfeng, CHEN Tao, LI Hang, ZHANG Haiying, CHEN Ming. Selective photoemission of Au photocathode[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 4 967-4 971(in Chinese).
- [12] 谢涛涛,张玉钧,王玺,孙晓泉. 基于微通道板的像增强器增益饱和效应研究[J]. 红外与激光工程,2018,47(11):195-200.  
XIE Yuntao, ZHANG Yujun, WANG Xi, SUN Xiaoquan. Research on the gain saturation effect of an image intensifier based on microchannel plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 195-200(in Chinese).
- [13] 王丹,贺永宁,叶鸣,崔万照. 金纳米结构表面二次电子发射特性[J]. 物理学报,2018,67(8): 233-242.

- WANG Dan, HE Yongning, YE Ming, CUI Wanzhao. Secondary electron emission characteristics of gold nanostructures[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(8): 233-242(in Chinese).
- [14] 李晓峰,常乐,邱永生,吴永祥,李永春. 微通道板近紫外量子效率测量及成像研究[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 175-181.
- LI Xiaofeng, CHANG Le, QIU Yongsheng, WU Yongxiang, LI Yongchun. Measurement of quantum yield and image of microchannel plate in near ultraviolet band[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 175-181(in Chinese).
- [15] 袁铮,陈韬,曹柱荣,孙可煦,易荣清,刘慎业. 金阴极微通道板探测器 X 射线段的能谱响应[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 787-790.
- YUAN Zheng, CHEN Tao, CAO Zhurong, SUN Kexu, YI Rongqing, LIU Shenye. Energy dependent sensitivity of Au-coated-microchannel plate detector in X-ray range[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 787-790 (in Chinese).
- [16] 顾运厅,林焱剑,闫保军,刘术林,杨玉真,余洋,温凯乐,王玉漫. 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): 1 109-1 113.
- GU Yunting, LIN Yanjian, YAN Baojun, LIU Shulin, YANG Yuzhen, YU Yang, WEN Kaile, WANG Yuman. 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): 1 109-1 113(in Chinese).
- (收稿日期:2022-01-05;修回日期:2022-06-15)