

金阴极的选择性光电效应*

袁 铮^{1)†} 刘慎业¹⁾ 曹柱荣¹⁾ 李云峰¹⁾²⁾ 陈 韬¹⁾
黎 航¹⁾ 张海鹰¹⁾ 陈 铭¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

(2009 年 8 月 25 日收到; 2009 年 10 月 28 日收到修改稿)

提出了一种测量金阴极的紫外光谱响应特性的方法. 利用微通道板 (microchannel plate, 简称 MCP) 对电子的高增益特性, 通过直接测量金阴极 MCP 探测器输出电流表征金阴极的紫外光响应. 测量金阴极 MCP 探测器在 200—340 nm 波段的光谱响应, 得到金阴极的谱响应特性: 金作为逸出功较大的金属, 也具有碱金属才有的选择性光电效应. 其选择峰值位于 5.72 eV 处, 通过理论验证了该峰值的位置.

关键词: 选择性光电效应, 金阴极, 紫外光谱响应, 微通道板

PACC: 7155D, 7240

1. 引 言

金 (Au) 作为光电阴极, 其发射稳定度高, 可多次暴露于大气之中而不改变其光电发射特性, 且光电流密度分布均匀. 本实验采用微通道板 (microchannel plate, 简称 MCP) 作为介质基片, 在其表面蒸镀一层 Au 薄膜作为其输入输出电极和光电转换阴极, 再加上电子接收装置, 就构成了 Au 阴极 MCP 光电探测器. MCP 是由含有铅、铋等氧化物的硅酸盐玻璃制成的一块通道壁具有良好二次电子发射性能和一定导电性能的微细空心通道玻璃纤维面板, 能够实现高增益电子倍增, 其两端面镀上 Au 膜后, 对几个 eV 能量的紫外光和几个 keV 能量的 X 射线均有响应.

由于 Au 的功函数为 4.9 eV^[1], 而波长为 10—390 nm 的紫外线对应的光子能量为 124.3—3.2 eV, 理论上, 光子能量高于 4.9 eV 的紫外光, 即波长小于 254 nm 的光都在 Au 阴极的光谱响应范围内. 为了更好地掌握 Au 的紫外响应特性, 受现有紫外光源的限制, 本课题组选择了 200—340 nm 波段 (3.66—6.22 eV) 的紫外线作为入射光. 借鉴前人无阴极裸 MCP 的响应^[2,3] 和镀膜 MCP 对 X 射线波

段的响应情况^[4-6] 的测量方法, 通过直接测量 Au 膜 MCP 探测器的输出电流来表征 Au 阴极 MCP 对于以一定光强入射的紫外光的响应度. 研究了 Au 阴极在 200—340 nm 波段的能谱响应, 以前只在碱金属和少数逸出功较大的金属 (如钼、镍、钽、钨、钡等) 中存在的选择性光电效应^[6], 在 Au 的光谱响应特性中也发现了选择性峰值.

2. Au 阴极光谱响应特性测量原理及方法

2.1. 测量原理

金属阴极光电效应产生的光电流比较低, 若直接测量则读数太小, 精确度难以达到. 若将该光电流进行放大再读取, 则准确度会大大提高. MCP 就是一种可对电子实现 10^3 — 10^4 倍高增益的器件^[7]. 镀有 Au 阴极的 MCP 基片由高铅硅酸盐玻璃制成, 具有良好的二次发射性能和一定的导电性能, 故可将其视为一个电阻电容器网络^[8-11], 各个通道电阻的并联构成整个工作区域的电阻, 即 MCP 的体电阻, 通常约 100 M Ω . 测量时, 将 MCP 作为一个大电阻, 弱电流计作为极小阻值的电流表, 与直流电源和地构成一个特殊的封闭电流回路, 弱电流计直接

* 国家自然科学基金 (批准号: 10905050) 资助的课题.

† E-mail: yuanzh8406@126.com

记录 Au 膜 MCP 的响应电流 $i_{\text{mcp}}(\lambda)$.

2.2. 实验设备及方法

实验时,将 Au 阴极 MCP 置于真空室内,采用真空电连接器实现真空室内外的电路连接,光源通过真空室的石英窗垂直照射到 MCP 输入面的 Au 阴极

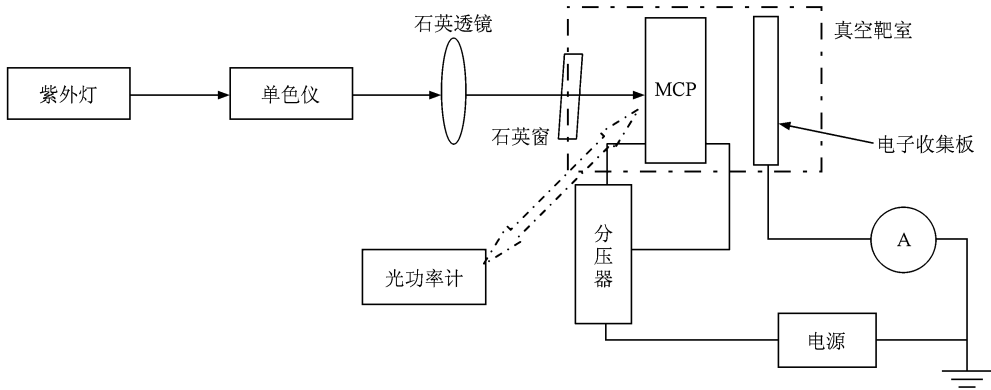


图1 实验装置示意图

2.3. 光源介绍

在不具备单能点连续可调紫外光源的情况下,采用紫外氙灯与单色仪配合作为入射单色紫外光源.氙灯光源属低气压电致发光灯,具有发射强度高、稳定性好、寿命长等特点.氙灯在点燃时能辐射出强而稳定的紫外连续光谱.用光谱仪对氙灯和单色仪构成的光源组合进行标定,其光谱见图2,其中纵坐标表示光强 I 的 CCD 计数值,横坐标表示入射光子能量 E_{ph} . Au 阴极的理论响应波长在 300 nm 以下^[12,13],实际入射光波长定在 200—340 nm 范围内,光子能量 E_{ph} 为 6.22—3.66 eV 范围.

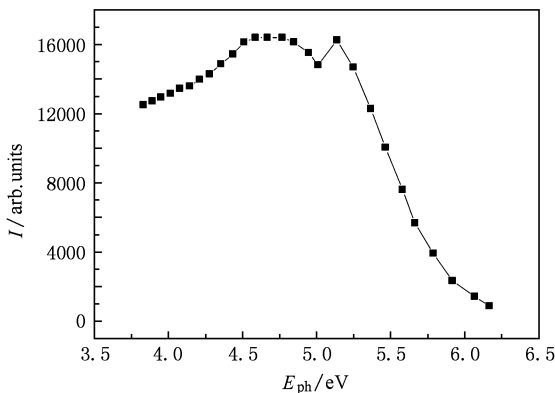


图2 组合光源光谱图

上.实验装置如图1所示.将负电源经分压器分压后分接 MCP 两端面,使 MCP 工作电压呈负值,再在 MCP 输出端后近贴放置电子收集装置并串接一个弱电流计接地,从而在正常工作时,实验装置与地构成封闭电流回路,弱电流计读出的便是 Au 阴极 MCP 探测器的响应电流 $i_{\text{mcp}}(\lambda)$.

3. 实验结果及分析

3.1. Au 阴极 MCP 探测器的响应

根据实验测得的探测器的响应电流及入射光强等数据,可得到该探测器的辐射灵敏度 S_k 曲线(如图3所示),其中两条不同的曲线分别表示 MCP 两端所加工作电压为 1000 和 800 V 时的响应情况,1000 V 时探测器的响应高于 800 V 时的响应,这是因为工作电压越大, MCP 增益越大.由图3还可看出,该探测器的辐射灵敏度随着入射光子能量 E_{ph} 的增大总体呈上升趋势,在 6 eV 附近达到峰值,而后下降.

一般认为 Au 的逸出功为 4.9 eV,根据爱因斯坦定律,当入射光子能量低于逸出功,即频率低于 ν_0 时,不论光强如何以及照射时间多长,都不会有光电子产生.从图3可知,当光子能量低于 4.9 eV 时,该探测器仍有响应.实际上爱因斯坦定律只是温度 $T=0$ K 的近似定律.由福勒光电子发射理论^[14],当 $T \neq 0$ K 时,只要测量仪器灵敏度够高,即使 $\nu < \nu_0$,仍可测到光电子,并不存在一个使光电子发射截止的阈值频率.

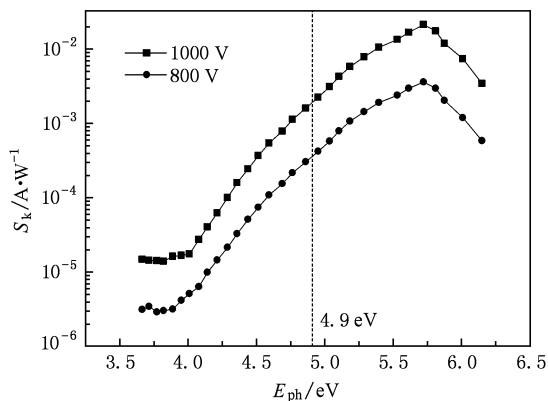


图3 Au膜MCP探测器的辐射灵敏度曲线

3.2. Au 阴极的选择性光电效应

由探测器的辐射灵敏度数据可得出 Au 阴极的量子效率 QE (quantum efficiency), 即光谱响应曲线 (如图 4 所示). 对于一般洁净的金属阴极, 其光电流是随着入射光频率的增加而单调增加的, 即其光谱响应特性曲线应随入射光子能量增大而单调上升, 这种情况称为正常光电效应. 由图 4 可知, Au 阴极的光谱响应并不是单调递增, 而是在 5.72 eV 处呈现一个峰值, 光子能量大于 5.72 eV 时, 光谱响应迅速衰减. 这是由金属阴极的选择性光电效应引起的. 选择性光电效应产生的原因如下^[14]: 在一定频率范围内, 金属中吸收了光子能量后激发到真空能级以上的自由电子数目随着频率的增高而增大, 而自由电子吸收光量子的概率在频率较高时将随着频率的增高而减小, 这两个因素共同作用, 造成了在某频率时光电子发射的峰值.

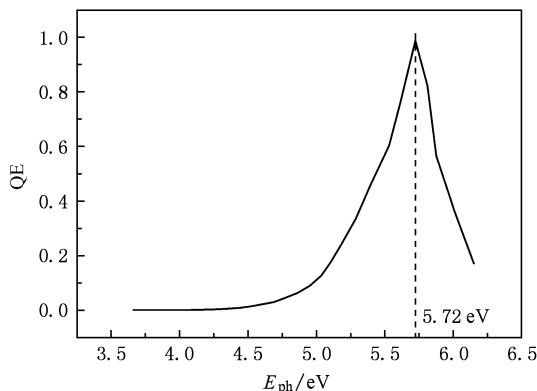


图4 Au阴极的光谱响应特性曲线

量子能量之前的瞬间, 处于原子最低能级上, 必须吸收等于 Fermi 能级能量与逸出功之和 (即金属表面势垒) 的光子能量才能逸出金属体外. 则有

$$\frac{1}{2}mV_{\min}^2 + h\nu_1 = W_a, \quad (1)$$

$$W_a = \phi + W_f,$$

其中, $\frac{1}{2}mV_{\min}^2$ 为电子具有的最小初动能; ν_1 为具有最小初动能的电子逸出所需要吸收的能量对应的入射光频率; W_f 为处于 Fermi 能级的电子具有的能量; ϕ 为金属的功函数; h 为普朗克常量; W_a 为金属表面势垒. 由于此时的电子处于原子的最低能级上, $\frac{1}{2}mV_{\min}^2 \approx 0$, 故 $h\nu_1 = \phi + W_f$.

对于金属中具有最大初动能的电子, 在吸收光子能量之前的瞬间, 处于原子的最高能级 Fermi 能级上, 并且就在金属表面附近, 因而只需要吸收足以克服逸出功的光子能量即可逸出, 则有

$$\frac{1}{2}mV_{\max}^2 + h\nu_2 = W_a,$$

$$\frac{1}{2}mV_{\max}^2 = W_f, \quad (2)$$

$$W_a = \phi + W_f,$$

其中, $\frac{1}{2}mV_{\max}^2$ 为电子最大初动能; ν_2 为具有最大初动能的电子逸出所需要吸收的能量对应的入射光频率. 由 (2) 式可知, $h\nu_2 = \phi$.

然而, 最大初动能和最小初动能只是两种极端情况, 大部分电子都具有介于二者之间的能量. 因此使金属中的电子逸出发射体外概率最大的光子能量应该在逸出功和金属表面势垒之间, 即 $\nu_2 < \nu < \nu_1$, 从而 $\phi < h\nu < \phi + W_f$. 因此, 金属的选择性光电效应的峰值应该在其逸出功和金属表面势垒之间. Au 的逸出功 $\phi = 4.9$ eV, 表面势垒高度 $W_a = 10.45$ eV. 由图 4 可见, 该光谱响应曲线的峰值为 5.72 eV, 正好位于该能区内. 过去只在碱金属和极少数逸出功大的金属 (如钽、钼、镍、钨等) 中发现了选择性峰值^[14], 本实验结果说明 Au 也具有选择性光电效应.

由量子力学理论, 常温下金属内部的电子服从 Fermi 分布定律, 即^[1]

$$dN = \frac{dZ}{Ce^{W/kT} + 1}, \quad (3)$$

其中, dN 和 dZ 分别表示某能量区间 (W 到 $W + dW$) 内的粒子数目及量子态数, 常数 $C = e^{-W_f/kT}$, k

对于金属中具有最小初动能的电子, 在吸收光

为玻尔兹曼常数, T 为温度. 以 $\omega(W)$ 表示 dZ 中某一能态被电子“占有”的概率, 则

$$\omega(W) = \frac{dN}{dZ} = \frac{1}{e^{(W-W_f)/kT} + 1}. \quad (4)$$

能量区间 W 到 $W + dW$ 内的量子状态数 dZ 可写为 $dZ = K_1 \sqrt{W} dW$. 其中, K_1 为与电子状态有关的常数. 故能量处在 W 到 $W + dW$ 之间的电子数为^[1]

$$\begin{aligned} dN_w &= K \sqrt{W} \omega(W) dW \\ &= \frac{K \sqrt{W}}{e^{(W-W_f)/kT} + 1} dW. \end{aligned} \quad (5)$$

当 $T > 0$ K 时, 对于 Au 有 $W_f = 5.5$ eV (W_f 随温度变化不大, 故以 $T = 0$ K 时的能量值代替), 则电子在 Au 内部的能量分布如图 5 所示. 金属体内能

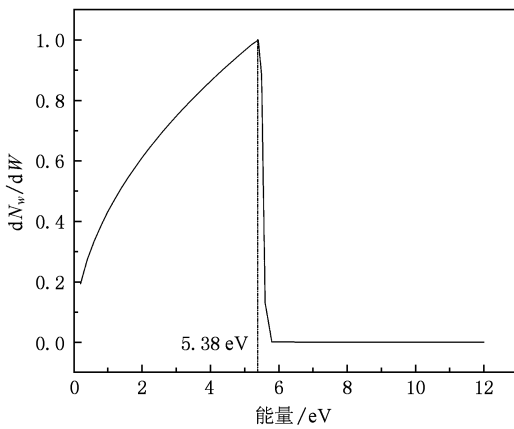


图 5 金属内电子的能量分布

量为 5.38 eV 的电子数最多. 由于电子在向金属表面运动的过程中常常发生碰撞, 会损失掉一部分能量, 若要使这些电子逸出金属体外, 则需要吸收的光子能量 E_{ph} 应大于等于 $W_a - W_f$, 即 $E_{ph} \geq 5.07$ eV. 这就是选择性光电效应峰值 5.72 eV 略大于 5.07 eV 的原因. 目前还没有理论计算可以准确得到选择性光电效应的峰值位置^[15-19], 但根据以上推论, 可以大致确定该峰值应略大于金属内电子的分布曲线中电子数目最大处对应的光子能量值.

4. 结 论

介绍了一种测量 Au 阴极的紫外光谱响应特性的方法, 将 Au 膜蒸镀到 MCP 上, 再配上电子接收装置形成一个 Au 阴极光电探测器, 通过直接测量该探测器的输出电流来表征 Au 阴极 MCP 对于以一定光强入射的紫外光的光谱响应. 通过分析 Au 阴极 MCP 在 200—340 nm 波段的光谱响应, 发现逸出功较大的 Au, 也具有以往只在碱金属中发现的选择性光电效应, 且其选择峰值位于 5.72 eV 处. 并通过理论分析推算出选择性光电效应峰值对应的光子能量值. Au 具有选择性光电效应这一发现加大了“所有金属都具有选择性光电效应”这一猜测的可能性. 实际上金属的光电子发射除了对光的频率有选择性以外, 对光的极化也有选择性^[7], 即对不同极化的光有不同的灵敏度和光谱特性.

[1] Liu X K 1980 *Electronics of Cathode* (Beijing: Science Press) p318 (in Chinese) [刘学毅 1980 阴极电子学 (北京: 科学出版社) 第 318 页]

[2] Li Y, Dan T R, Gao Y J, Cheng Y, Jiang D L, Tian J Q 2002 *Infrared Technology* **24** 31 (in Chinese) [李野、但唐仁、高延军、程轶、姜得龙、田景全 2002 红外技术 **24** 31]

[3] Wang H S, Li Y, Lu Y H, Tian J Q 1994 *J. Changchun Inst. Opt. Fine Mech.* **17** 30 (in Chinese) [王海山、李野、卢耀华、田景全 1994 长春光学精密机械学院学报 **17** 30]

[4] Ding L, Zhang Q J 1995 *Chin. J. Sensors and Actuators* **2** 1 (in Chinese) [丁力、张强基 1995 传感技术学报 **2** 1]

[5] Rochau G A, Bailey J E, Chandler G A, Nash T J, Nielsen D S, Dunham G S, Garcia O F, Joseph N R, Keister J W, Madlener W J, Morgan D V, Moy K J, Wu M 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E323

[6] Harding E C, Darke R P 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E312

[7] Zou Y S, Liu Y F, Bai T Z 1996 *Theory of Photoelectric Imaging* (Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology) p157 (in Chinese) [邹异松、刘玉凤、白廷柱 1996 光电成像原理 (北京: 北京理工大学出版社) 第 157 页]

[8] Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J, Wang Y M, Zhang W H, Zhang J Y, Liu J Y, Shan B, Gao S C, Ren Y L, Liu X Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1427 (in Chinese) [杨家敏、丁耀南、郑志坚、王耀梅、张文海、张继彦、刘进元、山冰、高盛琛、任有来、刘秀琴 2003 物理学报 **52** 1427]

[9] Tian J S, Zhao B S, Wu J J, Zhao W, Liu Y Q, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3368 (in Chinese) [田进寿、赵宝升、吴建军、赵卫、刘运全、张杰 2006 物理学报 **55** 3368]

[10] Kruschwitz C A, Wu M, Moy K, Rochau G 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 10E911

[11] Lowenstern M E, Harding E C, Huntington C M, Visco A J, Rathor G, Drake R P 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 10E912

- [12] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 1509
- [13] Henke B L, Smith J A 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 1852
- [14] Liu Y Z, Wang Z C, Dong Y Q 1995 *Electron Emitted and Photocathodes* (Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology) p150 (in Chinese) [刘元震、王仲春、董亚强 1995 电子发射与光电阴极 (北京: 北京理工大学出版社) 第 150 页]
- [15] Zhang X H, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhu X P, Zhao F F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1779 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、刘永安、缪震华、朱香平、赵菲菲 2009 物理学报 **58** 1779]
- [16] Zhu J, Yang Z, Chang B K, Qiao J L, Zhang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5002 (in Chinese) [朱 军、杨 智、常本康、乔建良、张益军 2009 物理学报 **58** 5002]
- [17] Wang Z N, Jiang M F, Ning Z Y, Zhu L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6507 (in Chinese) [王振宁、江美福、宁兆元、朱 丽 2008 物理学报 **57** 6507]
- [18] Lu Y H, Duan X B, Lü P, Zhang H J, Li H Y, Bao S N, He P M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4319 (in Chinese) [陆云豪、段效邦、吕 萍、张寒洁、李海洋、鲍世宁、何丕模 2005 物理学报 **54** 4319]
- [19] Zhang X J, Zhang J M, Xu K W 2006 *Chin. Phys.* **15** 2108

Selective photoemission of Au photocathode*

Yuan Zheng^{1)†} Liu Shen-Ye¹⁾ Cao Zhu-Rong¹⁾ Li Yun-Feng¹⁾²⁾
Chen Tao¹⁾ Li Hang¹⁾ Zhang Hai-Ying¹⁾ Chen Ming¹⁾

1) (Reserch Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (College of Photoelectric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Received 25 August 2009; revised manuscript received 28 October 2009)

Abstract

A method for measuring the ultraviolet spectrum characteristic of Au photocathode has been put forward. Making use of the high gain characteristic of microchannel plate (MCP) and ultraviolet light, the frequency response of Au cathode has been studied by measuring the output current of Au coated MCP detector directly. Through measuring the response current of Au coated MCP detector between 200—340 nm, the selective photoemission of Au has been found, which had been found only for alkali metals. And the selective peak is at 5.72 eV, which can be explained by quantum mechanics theory.

Keywords: selective photoemission, Au photocathode, UV spectrum characteristic, microchannel plate

PACC: 7155D, 7240

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050).

† E-mail: yuazh8406@126.com