

提高分幅像管阴极效率的实验研究*

白晓红^{1,2}, 白永林¹, 刘百玉¹, 杨文正^{1,2}, 秦君军¹,
赵军平¹, 田进寿¹, 欧阳娴¹, 曹柱荣³, 赵卫¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在超快诊断中, 诊断设备分幅像管的阴极效率一直是一项工艺上需要提高的参数. 本文中通过采用不同镀入角度、镀入通道深度、镀膜的厚度以及成膜时的真空度等各个参数制备阴极, 获得不同的阴极转换效率. 经过试验测试和理论计算, 这些参数存在一个匹配的最佳值, 当镀膜工艺满足这个参数时, 可以使相机增益显著提高.

关键词: 超快诊断; 分幅像管; 阴极; 增益

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

0 引言

诊断设备分幅像管主要分三部分: 阴极微带光电转化及传输部分, MCP 倍增部分和荧光屏成像部分. 对于阴极微带部分, 曾经有人专门研究过 CsI 阴极微带的制作工艺, 使其量子转换效率接近理论计算结果^[4]. 但 CsI 容易吸潮, 主要用于封闭系统中. 本文所研究的分幅像管为开放式系统, 采用 Au 膜作为阴极微带. 由于蒸镀金属是比较容易的一种蒸发工艺, 所以人们主要关注在不同波长时各种金属薄膜的 η (量子转换效率), 并且计算了由微通道板 (Micro Channel-Plate, MCP) 的不同斜切角决定的蒸发入射膜层深度对量子效率的影响, 而忽略了蒸发 Au 的厚度以及其致密程度对 η 的影响. 本文在 MCP 斜切角一定的情况下, 分别讨论不同蒸发入射角、Au 膜的不同厚度以及膜层的致密程度对增益的影响.

使用一块 MCP 分区镀制微带线, 其目的是在同一条件下测试不同工艺产生的不同增益. 并且由于 MCP 比较昂贵, 分区试验可以节省成本.

1 物理过程

X 射线分幅像管采用特殊工艺将阴极材料蒸镀在微通道板输入端, 构成典型的 MCP 反射式 X 射线阴极. 当一个能量为 $E(\text{keV})$ 或是波长为 $\lambda(\text{nm})=1.24/E$ 的 X 射线光子打在厚度为 d 的阴极材料某点上时, 在该点产生一次光电子, 一次光电子在行进过程中不断碰撞通道壁将产生多个二次电子, 这些电子一经逸出体外, 即会在 MCP 两端电场作用下, 轰击通道对

面的阴极材料层或通道壁, 以大于 1 的二次电子发射系数, 经过多极电子倍增, 在 MCP 输出端形成电子流放大数千甚至上万倍的电子云, 进而在板屏高压电场作用下, 轰击荧光屏, 最终为人眼提供一幅被检物体 X 射线透射强度二维空间分布的可见光再现图^[5].

金属光电发射理论比较成熟, 可用福勒理论作为定量分析和讨论. 实践中光电发射特性主要取决于光电阴极薄膜结构、厚度和工艺特性.

2 特殊工艺

2.1 入射角度最优化

在实验中, 改变蒸发舟与 MCP 之间的夹角, 分

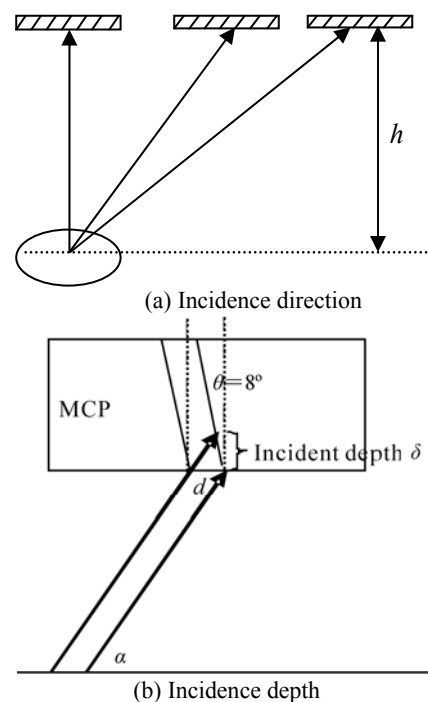


图 1 蒸镀入射方向和镀入深度计算原理

Fig. 1 Incidence direction of coating film and incidence depth of calculation schematic

*国家自然科学基金(60777027)资助

Tel: 029- 83011478 Email: bxh@opt.ac.cn

收稿日期: 2008-09-10

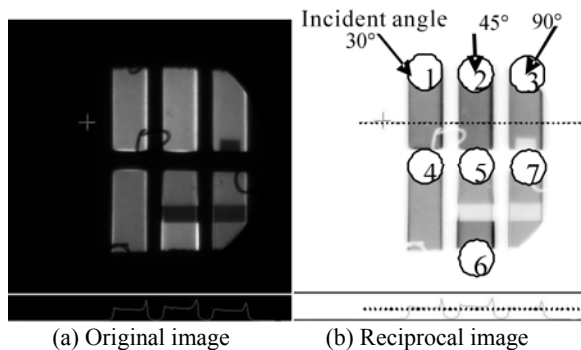
别选用入射角 α 为 $30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, 见图 1. 对于不同入射角度, MCP 与蒸发源平面始终相距同一高度 h . 这样被蒸发出的分子进入 MCP 通道内的深度便不一样. 所使用的 MCP 倾斜角为 $\theta = 8^\circ$, MCP 孔径为 $d = 12 \mu\text{m}$. 在一定的真空度时, 分子的自由程很长, 可以认为是分子直线运动.

根据图 1, 利用相似三角形的计算原理, 可得到不同入射角时镀入的深度 δ .

表 1 不同镀膜入射角获得的不同增益

序号	入射角 α	镀入深度 $\delta/\mu\text{m}$	图 2 中十字架丝处的平均增益
1	30°	9.72	12451
2	45°	10.57	13025
3	90°	12.12	12110

实验结果如图 2: 图中①、②和③分别是三种入射角度得到的增益结果, 下方曲线是由十字架丝所对的水平位置计算出来的平均增益幅度(为了更好的看清楚增益, 把拍摄结果反色, 颜色越深表示增益越好, 图 2(a)为原始图, 图 2(b)为反色图). 由表中读数可以看出 45° 比 30° 好, 90° 比 30° 差.



(a) Original image (b) Reciprocal image

图 2 不同入射角对应的不同增益结果

Fig. 2 Different gain results due to different incidence angle

在 MCP 通道中若是阴极镀入的较深, 则由镀入阴极转换成的光电子在继续二次倍增的过程中, 倍增距离就相对减小, 倍增次数就会减少, 这样便导致增益下降; 若是阴极镀入的较浅, 则阴极转换区域减小, 转换出的电子少, 也会导致增益下降. 但是由于三个角度的镀入深度相差不大, 所以增益区别也不大. 从实验结果来看, 可以采用 45° 入射角进行蒸镀.

2.2 镀膜层厚度最佳化

Au 阴极微带的作用有两个: 一是进行光电转换的阴极作用; 二是光电信号传输通道的微带作用. 因此其厚度不能太薄, 因为具有一定厚度的膜层可以降低微带阻抗, 使电脉冲传输过程中避免产生较大的信号损失. 但是理论上 Au 膜的厚度不同, 光电发射能力也不同, 所以在 MCP 上先蒸镀一定厚度 Cu 膜, 使微带阻抗降至一定程度, 然后再蒸镀不同厚度的 Au 膜, 以保证 Au 膜的量子转化效率.

实验中先蒸镀一定厚度的 Cu 膜, 使微带阻抗降至 1Ω 以下. 然后分别蒸镀各种厚度的 Au 膜, 图 3 是膜层厚度与发射电流的关系图. 结果表明, Au 膜在厚度为 350 nm 时, 发射最大值可达 $1.27 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ (该实验在 253 nm 紫外灯照射下进行).

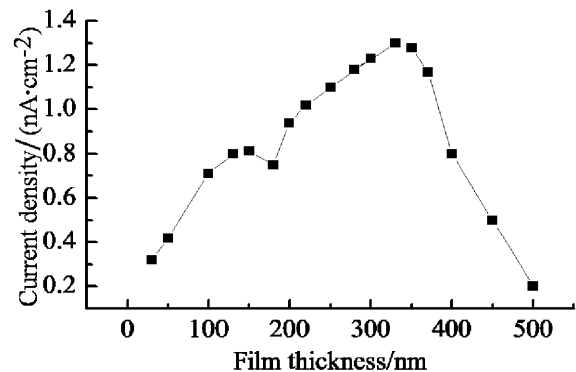


图 3 Au 厚度与发射电流的关系

Fig. 3 Relations between Au thickness and current

在已知 Au 膜厚度和发射电流之间的关系后, 在一块 MCP 上 1、3 微带蒸镀了 350 nm 的 Au 膜; 2、4 微带上蒸镀了 450 nm 的 Au 膜, 其基底是厚度相同的 Cu. 结果见图 4, 可以看出: 1、3 两条微带的增益比 2、4 这两条微带增益高, 而且由图中增益均匀值可以看出, 1、3 微带的增益是 2、4 微带增益的 2 倍左右, 和图 3 的测试结果是吻合的.

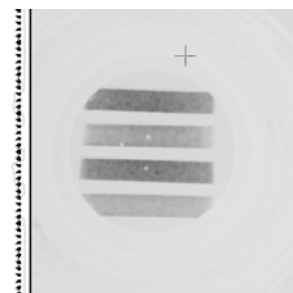


图 4 微带线及其增益

Fig. 4 The result of different Au thickness

2.3 镀膜致密程度最佳化

在 MCP 反射式 X 射线光阴极的量子效率中兼顾“吸收”和“逸出”两个概率, 但吸收概率 P_{ab} 和逸出概率 P_{es} 对 X 光阴极材料厚度及疏松程度具有截然相反的技术要求. 下面是反射式阴极量子效率 η_r 的表达式, 对 $0 - \delta$ 路径上产生的一次电子总数进行积分, 忽略反射影响, 则有

$$\eta_r(E, \theta) = N_x(E, \theta) \sigma(E, \theta) P_x(0) \int_0^\delta \mu \csc \theta \cdot e^{-\mu \csc \theta z} e^{-z/L_s} dz = N_x(E, \theta) \sigma(E, \theta) P_s(0) \cdot [\mu L_s \csc \theta / (\mu L_s \csc \theta + 1)] [1 - e^{-(\mu \csc \theta + L_s^{-1})\delta}]$$

上式是 MCP 反射阴极工艺设计的主要依据^[5]. 对于同一块 MCP, 固定了 MCP 斜切角后, 主要控制 P_{es} 对量子效率的影响. 考虑到 X 光子穿透阴极层能力强, 且能量愈大, 穿透愈深, 深层产生的二次电子更难逸出, P_{es} 会因此下降, 这就意味着对一定 X

光子能量, 存在一个最佳阴极厚度, 能同时兼顾 P_{ab} 和 P_{cs} 两个因子的最佳取值, 使综合效果 η_r 达到最大. X 射线穿透能力强, 吸收概率小的特点是导致 X 射线阴极量子效率低且不得作的太厚的根本原因.

真空室内真空越高, 固体物质蒸发的分子与气体分子碰撞几率就越少, 薄膜就越致密. 但是膜层致密不利于电子的逸出, 所以通过控制真空度的高低来控制所镀膜层的疏密程度.

图 5 中②⑤⑥分别是入射角度为 45° 时, 不同疏密的 Au 膜结构的增益结果. 图中, ②是完全低真空下蒸镀的结果; ⑤是高真空时致密膜层的结果; ⑥是先致密后疏松的 Au 膜的结果, 三种试验的总厚度都是 350 nm. 可以看出膜层致密程度对增益是有一定影响的, 但现在还未摸索出最佳的疏密结构和厚度, 这是需要继续开展的工作, 而且会考虑疏松+致密结构或是更多种结构对增益是否有作用.

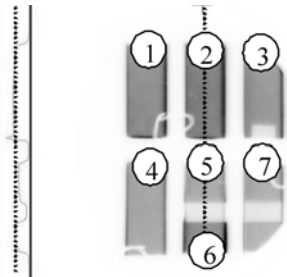


图 5 不同疏密的 Au 膜的增益结果

Fig. 5 The gain result of different density Au film

3 结论

通过试验各种镀膜结构、厚度等工艺, 初步提出了在入射 45° , 厚度为 350 nm, 膜层在低真空下获得疏松结构时可以获得比较好的增益. 但是疏松到何程度, 是否为疏松和致密相间隔会获得更好的结果, 还有待研究.

参考文献

- [1] BRADLEY D K, BELL P M. Development and characterization of a pair of 30~40 ps X-ray framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 716-718.
- [2] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xiu-qin, *et al.* Gated MCP framing camera with 60 ps exposure time[C]. *SPIE*, 1995, **2549**: 53-59
- [3] QIU Meng-tong, ZHANG Mei, LUO Jian-hui, *et al.* Study of gating characteristics of micro-strip image intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 505-508
邱孟通, 张美, 罗建辉, 等. 微带像增强器的选通特性研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4): 505-508
- [4] CHANG Zeng-hu, SHAN Bing, LIU Xiu-Qin, *et al.* Numerical simulation of picosecond voltage pulse gated microchannel plate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(6): 501-508
常增虎, 山冰, 刘秀琴, 等. 微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机 [J]. *光子学报*, 1995, **24**(6): 501-508
- [5] SHAN Bing, CHANG Zeng-hu, LIU Jin-yuan, *et al.* Gated MCP framing camera system[C]. *SPIE*, 1997, **2869**: 182-188
- [6] ZHANG Yun-shen, JIANG De-long. Study of Transmission-type Near-UV Photocathode[J]. *Opt Precision Eng*, 1993, **1**(8): 47-50
张云深, 姜德龙. 透射式近 UV 光阴极的研究[J]. *光学精密工程*, 1993, **1**(8): 47-50
- [7] ZOU Yi-song. Electron imaging tube and theory analysis[M]. Beijing: National Industry Press, 1989.
邹异松. 电真空成像器件及理论分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

Increasing Quantum Efficiency of Au Photocathode in X-ray Framing Camera

BAI Xiao-hong^{1,2}, BAI Yong-lin¹, LIU Bai-yu¹, YANG Wen-zheng¹, QIN Jun-jun¹, ZHAO Jun-ping¹,
TIAN Jin-shou¹, OU-YANG Xian¹, CAO Zhu-rong³, ZHAO Wei¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photons, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

(3 Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Received date: 2008-09-10

Abstract: The performance of Au photocathode has been characterized for use with grazing incidence soft X-rays. The quantum efficiency of a Au photocathode has been measured using different incidence angle of coating, and different depth of photocathode in the micro-channel, and different thickness of Au film, and different density of the photocathode. The significant improvement is found for the incidence angle is 45° and thickness of Au film is 350 nm. But the effect of density of photocathode is studying. Theoretical predictions agree accurately with experiment.

Key words: Ultra-fast diagnosis; Framing tube; cathode; Quantum efficiency; Gain



BAI Xiao-hong was born in 1975 and received the B. S. degree from Physics Department of Northwest University in 1998. Now she is studying for her M.S. degree at State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and her research interests focus on the image tube designing and production.