

金阴极微通道板能谱响应的理论研究*

袁铮^{1,2}, 刘慎业¹, 肖沙里², 曹柱荣¹, 黎航¹, 王丽伟^{1,2}

(1 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

(2 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400030)

摘要:分析了金阴极微通道板在 X 射线段(0.1~10 keV)的能谱响应,从阴极量子效率, X 射线在通道材料中的衰减,微通道壁的铅层的光电效应,微通道板通道增益等多个方面进行综合计算,结果表明:得出较完善的阴极型微通道板能谱响应理论公式及其数值模拟曲线.在只考虑一个通道,增益值为 1 时,微通道板的能谱响应完全取决于金阴极的量子效率,若考虑多通道效应,微通道板的能谱响应受通道材料元素吸收边的影响发生突变,且通道数目越多,影响越显著;能谱响应随电压增大呈增长趋势,但会受到微通道板饱和电流的限制.实验给出了微通道板能谱响应与入射角的关系曲线,确定了能获得增益的最小入射角.

关键词:微通道板;能谱响应;光电效应;金阴极;量子效率

中图分类号: TN144.1; O434.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)10-2495-6

0 引言

激光聚变等离子体可以产生大量的 X 射线,包括连续辐射和线辐射.在惯性约束聚变实验诊断中,为了更好地了解束能量的吸收,等离子体加热和压缩过程,以及研究束与等离子体相互作用中的物理过程,要求实验诊断设备能给出辐射 X 射线的各项特征,包括时间、空间和能谱的三维信息. X 射线分幅相机采用针孔阵列加微带结构的门控微通道板技术实现分幅,能同时对 X 射线进行一维时间,二维空间和能谱的三方面分辨.分幅相机一般由五部分构成:针孔阵列、皮秒高压脉冲发生器、微带微通道板(Microchannel Plate, MCP)、荧光屏、电荷耦合器件 CCD. MCP 是分幅相机的核心部件,是由几百万乃至上千万个平行堆积的单通道电子倍增器组成的薄板.它实质上是一块通道内壁具有良好的连续二次电子发射特性和一定导电性能的微细空心通道铅玻璃纤维面板.电子从 MCP 输入端打在 MCP 微孔内表面经还原的铅层上,按一定增益激发出二次电子,二次电子在外电场和自身速度作用下沿通道行进一段距离后再次打到微通道内壁上,激发出更多的二次电子,直到所有电子走完微通道的长度.

为了定量分析高温等离子体辐射 X 射线的强度及其他信息,需要清楚的知道相机对于每一个 X 射线能点的响应程度,而这主要取决于光阴极对不同入射能量光子的量子效率和 MCP 对电子的倍增

情况.国内外研究表明, MCP 探测器的能谱响应度与入射角度和 MCP 工作电压有关^[1-2].本文推论并模拟了镀金阴极的 MCP 的能谱响应,考虑了穿透微通道壁的 X 射线照射铅层产生的光电效应.分析了考虑多通道效应与否给能谱响应曲线带来的差异.

1 阴极型 MCP 的二维能谱响应模型

阴极型 MCP 是指在 MCP 的两面镀上金属层,既作为分幅相机的光电子阴极,又充当 MCP 的输入输出电极.本文主要针对实验中常使用的分幅相机,其 MCP 输入输出面上一般镀三层金属(镍,铜,金).镍有很好的粘接作用可将金属层与微通道板的铅玻璃层很好的粘合起来,铜的电阻率极小,导电性非常好,而采用金镀在最表层则是因为金的量子效率较好,暴露于空气中的稳定性好且其发射的光电子能量弥散小.由于 MCP 中微通道为对称均匀排布,可将 MCP 的三维微通道阵列简化为二维模型以便于对其能谱响应的研究,如图 1.

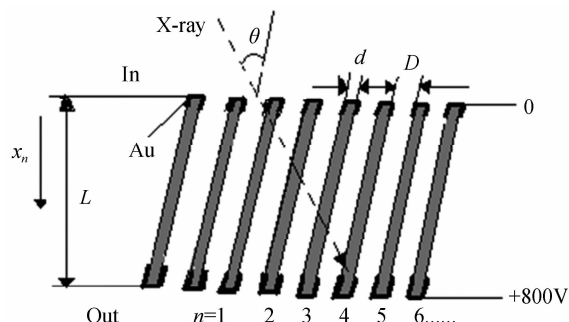


图 1 阴极型 MCP 的二维模型

Fig. 1 2D model of Au coated MCP

单个人射光子引起的能量响应度表达式为^[2]

* 国家高技术项目资助

Tel: 0816-2480642

Email: yuanzh8406@126.com

收稿日期: 2008-09-27

修回日期: 2008-12-24

$$Q(E, \theta) = E^{-1} Y(E, \theta) \sum_k I_k(E, \theta) G_k(\theta) \quad (1)$$

式中, θ 为 X 射线与 MCP 微通道轴的夹角(即入射角), E 为入射光子能量, $Y(E, \theta)$ 表示光电子产额, $I_k(E, \theta)$ 为 X 射线穿透从入射点计数的第 $(k-1)$ 个通道处残余的光强, $G_k(\theta)$ 为第 k 个通道的增益.

1.1 光电子产额

根据光子与物质相互作用原理可知, 光子能量为 $0.1 \sim 10$ keV 的 X 射线照射到阴极上光电效应占优势, 其能量有三种转化形式: 光电子、俄歇电子或荧光辐射. 而这其中, 只有极少能量转化为俄歇电子和荧光辐射, 其余均被用于光电子的产生. 所以单位面积上的光电子总能量应近似等于该面积上有效电子逃逸深度内所吸收的光子能量. 光阴极单位面积上, 有效逃逸深度内所激发的光电子数目与入射 X 射线能量的关系为^[3]

$$\bar{N} \bar{E}_k \approx I_0 \rho E \mu(E) \lambda \quad (2)$$

式中, \bar{E}_k 为激发出的光电子的平均能量; N 为光电子数目; I_0 为单位面积上法线入射的能量为 E 的光子数目; ρ 为光阴极质量密度, E 为光子能量; $\mu(E)$ 为光阴极的质量光致电离截面; λ 为有效逃逸深度.

由光子激发产生的光电子, 有一部分未经碰撞产生二次电子就逸出光阴极表面, 令其为首次光电子, 以 Y_p 计其产额; 另一部分经再次碰撞产生二次电子而后逸出阴极表面, 称其为二次光电子, 以 Y_s 计其产额. 从而, 总的光电子产额 Y_T , 应为 $Y_T = Y_s + Y_p$. 有实验数据显示^[3] $Y_s \geq Y_p$, 故 $Y_T \approx Y_s$.

对本文研究的 MCP 的阴极材料是金, 所产生的二次光电子能量分布不随入射 X 射线能量的变化而改变, 故 \bar{E}_{ks} 对于给定的金阴极是一个常量. 以 Y_s 表示每个入射光子产生的能够逃逸出光阴极表面的二次光电子的产额. 则由式(2), 有

$$Y_s = K_s \rho E \mu(E) \lambda_s \quad (3)$$

式中, K_s 是与二次光电子有关的比例常量, λ_s 为二次电子的有效逃逸深度.

对于很薄的光阴极, 有前表面发射和后表面发射两种情形, 鉴于 MCP 上金阴极的特殊蒸镀情况, 在计算二次电子产额时应为这两种情形的总和, 即 $Y_s = Y_f + Y_b$. 其中, Y_f 为前表面的二次光电子产额, Y_b 为后表面的二次电子产额.

根据 Kane 的理论, 假设两个电子相撞后会损失掉无规则运动的电子的部分能量, 使其能量低于真空能级而不足以逃出阴极表面的束缚. 定义电子与电子碰撞的线性散射截面(即反自由程)为 b ; 而电子与声子碰撞截面定义为 a (每次碰撞能量损失很小). 对于金属, 二次电子发生电子-电子碰撞被降

到真空能级以下的几率大得多, 即对金属而言, 有 $b \geq a$.

考虑光子在光阴极内的平均衰减长度 $(\mu\rho)^{-1}$ 远大于平均自由程 b^{-1} , 从而, 前表面和后表面的产额 Y_f, Y_b 与光阴极厚度 t 的函数关系为^[3]

$$Y_f = K \rho E \mu(E) \cdot \frac{1 - e^{-kt}}{1 + \delta e^{-kt}} \frac{q}{k^2 + q} \quad (4)$$

$$Y_b = K \rho E \mu(E) \cdot \frac{q e^{-kpt}}{k^2 + q} \frac{1 - e^{-kt}}{1 + \delta e^{-kt}} \quad (5)$$

式中, 参量 $q = a + b$, $k = (b^2 + ab)^{1/2}$, $\delta = (q - k)/(q + k)$. K 为依赖于金阴极电参量(Fermi 能级 E_F 和功函数 W)的材料常量. 对金属, 因为 $b \geq a$, 有 $q \approx b$, $k \approx b$, $\delta \approx 0$, $\lambda_s = 1/b$. 则式(4), (5)可化简为

$$Y_f = \frac{1}{2} K \rho E \mu(E) \lambda_s (1 - e^{-t/\lambda_s}) \quad (6)$$

$$Y_b = \frac{1}{2} K \rho E \mu(E) \lambda_s e^{-t/\lambda_x} (1 - e^{-t/\lambda_s}) \quad (7)$$

式中, λ_x 为 X 射线衰减长度, 有 $\lambda_x = (\mu\rho)^{-1}$. 对于金属 Au, 取 $\lambda_s = 4$ nm, 且其二次电子的平均逃逸深度比 X 射线衰减长度小, 即 $\lambda_s < \lambda_x$. 由式(5), (6), 有

$$Y_s = \frac{1}{2} K \rho E \mu(E) \lambda_s (1 - e^{-t/\lambda_s}) (1 + e^{-t/\lambda_x}) \quad (8)$$

式中 K 的值为^[4]: $K = e^4 k_F^3 / 3\pi$, k_F 为 Au 的费米波矢.

因此, 金阴极光电子总产额

$$Y_T \approx Y_s = \rho E \mu(E) \lambda_s \frac{e^4 k_F^3}{6\pi} (1 - e^{-t/\lambda_s}) (1 + e^{-t/\lambda_x}) \quad (9)$$

1.2 X 射线入射到第 k 个通道时的残余光强

如图 1, 当 X 射线入射角(X 射线与微通道轴的夹角)为 θ 时, 其在输入面的投影为 $I_0(E) \sin \theta$, 即输入面上的初始光强为 $I_0(E) \sin \theta$. 由于 MCP 材料对 X 射线的透射粒子强度随吸收体的厚度呈指数衰减 $I = I_0 e^{-\mu' d}$, 故 X 射线在 MCP 中穿透 X 射线经过 $(k-1)$ 个微通道后进入第 k 个通道时的光强应为

$$I_k(E, \theta) = I_0(E) \cdot \sin \theta \cdot e^{-\mu'(E) \cdot d \cdot (k-1) / \sin \theta} \quad (10)$$

式中, $\mu'(E)$ 为 MCP 材料对 X 射线的线性吸收系数, $d(k-1)/\sin \theta = t$ 为穿透厚度. d 为通道壁厚度, k 为通道序数, θ 为入射角.

已知单个光子与物质的相互作用包括光电效应, 康普顿效应和电子对效应. 则总的作用截面为 $\sigma'_r = \sigma'_{ph} + \sigma'_c + \sigma'_p$, 其中 σ'_{ph} , σ'_c 和 σ'_p 分别代表光电截面、康普顿截面和电子对效应截面. 以 N' 表示吸收物质单位体积内的原子数, 则线性吸收系数 $\mu'(E) = \sigma'_r \cdot N'$ 对于低能 X 射线(能量低于 150 keV), X 光子与物质相互作用中光电效应占绝对主导地位, 故康普顿效应和电子对效应可忽略, 此

时 $\sigma_r = \sigma_{ph}$. 由量子力学计算可知,在非相对论情况下,即 $h\nu \ll m_0 c^2$ 时(m_0 为电子质量, c 为光速),K 层的光电截面为^[5]

$$\sigma'_k = (32)^{1/2} \alpha^4 \left(\frac{m_0 c^2}{h\nu} \right)^{7/2} Z^5 \sigma_{Th} \quad (11)$$

式中, α 为精细结构参量, $\alpha = 1/137$; σ_{Th} 为常量, $\sigma_{Th} = \frac{8}{3} \pi (e/m_0 c^2) = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$.

由于光子在原子的 L、M 等壳层上的光电截面比 K 层小得多,故光电效应总截面可视为^[5]: $\sigma'_{ph} = 5\sigma'_k/4$.

对于含有多种元素的材料,X 射线原子在其中的光电截面应为各元素光电效应的和^[6],即 $\sigma'_{ph} = \frac{5}{4} \sigma'_k = \frac{5}{4} \sum_j \tau_j \sigma'_{kj}$ (τ_j 为各元素重量百分比, σ'_{kj} 为各元素 K 层光电截面). MCP 是由高铅玻璃材料制成,主要组份为 Si, Pb, O 和 Bi, 其密度为 2.056 g/cm^3 (线密度 0.21 g/cm). 根据生产厂商提供的材料组份为: SiO₂, PbO, Bi 的质量分数分别为 50%, 27%, 10%; SiO₂, PbO, Bi 的摩尔分数分别为 0.83, 0.12, 0.05; Si, Pb, O, Bi 的质量分数分别为 23.37%, 25%, 28.56%, 23.07%. 设 ρ 为 MCP 通道壁的线密度, t 为穿透厚度, m_j 为原子质量, 对于含有多种元素的 MCP 通道材料, 单位体积内的原子数为 $N' = \rho t \sum_j \tau_j / m_j$. 因此, MCP 材料对 X 射线的线性吸收系数为

$$\mu'(E) = \frac{5}{4} \frac{\sqrt{32}}{4} \alpha^4 \sigma_{Th} \left(\frac{m_0 c^2}{E} \right)^{7/2} \rho t \sum_j Z_j^5 \tau_j^2 / m_j \quad (12)$$

从而,光子能量为 E 的入射 X 射线,进入第 k 个微通道的光强为

$$I_k(E, \theta) = I_0(E) \sin \theta \exp(-5 \sqrt{32}/4 [d(k-1)/\sin \theta]^4 \rho t \sigma_{Th} (m_0 c^2/E)^{7/2} \sum_j Z_j^5 \tau_j^2 / m_j) \quad (13)$$

1.3 每个微通道的增益

将每个微通道板看作 r 级离散打拿极 (Discrete Dynode) 组成,每一级的增益与其电压有指数关系^[7]: $G_s = (V/Hr)^m$ (其中 r 为打拿极级数, m 和 H 为与打拿极长度和二次电子发射产额有关的常量), 则一个通道的增益 $G_c = G_s^r$. 每个电子相邻两次碰撞到微通道壁的飞行距离约为 $4D$ ^[8-9], 故级数 $r = L/4D = \epsilon/4$, 其中 ϵ 为长径比, 通常取 40. 故当 $m = 1$ 时, 有 $G_c = (V/Hr)^{mr} = (V/C\epsilon)^{\epsilon/4}$, 其中, C 为与 MCP 处理工艺有关的常量, 根据厂家提供的信息, 该 MCP 已经过电子冲刷工艺, 取 $C = 9.75$, 故当 MCP 的偏压为 -392 V 时, MCP 增益为 1.

当 X 射线以一定角度倾斜入射到 MCP 上时,

有部分 X 光能穿透前 $(k-1)$ 个硅酸盐玻璃壁而进入第 k 个通道, 并照射到通道 k 的另一壁上, 设此入射点距 MCP 输入面的距离为 x_k , 从而在此有增益效果的打拿极级数将小于 r , 故第 k 个微通道对二次电子的增益应为

$$G_k(\theta) = (V/C\epsilon)^{(1-x_k/t)\epsilon/4} \quad (14)$$

当 $k=1$ 时, 发生光电效应产生光电子的只有金阴极, 当 $k>1$ 时, 穿透微通道壁的剩余光强将照射在 MCP 微孔内壁的铅层上, 由于铅也有一定的光电发射特性, 故也会产生光电子, 进入微通道再进行倍增. 将式 (9), (13) ~ (14) 代入式 (1), 则阴极型 MCP 的能谱响应应为

$$Q(E, \theta) = \frac{e^4 k_{F1}^3}{3\pi} \rho_1 \mu_1(E) \lambda_{S1} (1 - e^{-t/\lambda_{S1}}) (1 + e^{-t/\lambda_{X1}}) \cdot I_0(E) \sin \theta \left(\frac{V}{C\epsilon} \right)^{\epsilon/4} + \frac{e^4 k_{F2}^3}{3\pi} \rho_2 \mu_2(E) \lambda_{S2} (1 - e^{-t/\lambda_{S2}}) + (1 + e^{-t/\lambda_{X2}}) \sum_{k>1} \left[I_0(E) \sin \theta \cdot e^{-\mu'_{mcp}(E) d(k-1)/\sin \theta} \left(\frac{V}{C\epsilon} \right)^{(1-x_k/t)\epsilon/4} \right] \quad (15)$$

式中, k_{F1} 、 ρ_1 、 $\mu_1(E)$ 、 λ_{S1} 和 λ_{X1} 分别是金的费米波矢, 密度, 质量光致电离截面, 二次电子逃逸深度及其衰减长度. k_{F2} 、 ρ_2 、 $\mu_2(E)$ 、 λ_{S2} 和 λ_{X2} 为对应的铅的各项参量. μ'_{mcp} 表示 MCP 通道材料的线性吸收系数, e 为电子电量.

2 模拟结果及理论分析

根据大量实验数据绘制的金阴极量子效率曲线图^[3], 总量子效率与 $E_{\mu}(E)$ 随入射光子能量的变化趋势是相同的. 根据式 (9), 软件模拟得到光电子总产额变化曲线, 见图 2. 同时将 $E_{\mu}(E)$ 随光子能量变化的曲线列于图中, 由图可见, 这与文献^[3]的实验研究结论相一致.

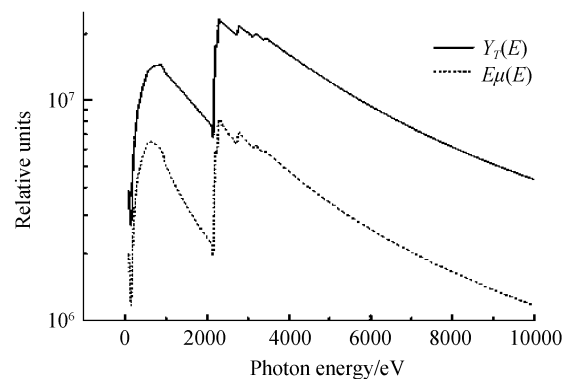


图 2 100 nm 金阴极的光电子产额曲线(与 $E_{\mu}(E)$ 对比)
Fig. 2 Photoelectron yield for a 100 nm evaporated gold photocathode [Compared to $E_{\mu}(E)$]

不考虑多通道效应对 MCP 能谱响应的影响

时,则 $n=1$,对 MCP 响应贡献光电子的只有金阴极,此时微通道内壁的铅层只起导电作用,使得外加电压源的电子可以补充二次电子的发射,以实现连续不断的电子增益.根据能谱响应理论公式(15),当通道数目为 1 时,进行数值模拟得到的理论响应曲线如图 3(a),其中 θ 定为 15° ,MCP 电压为 -392 V ,所得曲线是相对于 900 eV 时响应值的比值.由图 3 可知,镀金阴极 MCP 的能谱响应度随入射光子能量的增加呈下降趋势.且其与金阴极的光电子产额在变化趋势上基本吻合,其曲线突变点与 Y_T 的突变点完全重合.因而,只计算单个通道时,不考虑 X 射线将微通道壁穿透的情况,若同时将 MCP 增益设为 1(即 MCP 所加偏压定为 -392 V),此时 MCP 的能谱响应曲线实际上代表的是镀金阴极 MCP 的总量子效率曲线.当通道数目增加为 2,所得曲线(归一化到 $E=900\text{ eV}, n=1, \theta=15^\circ, V=-392\text{ V}$ 时的响应值)如图 3(b),由于考虑了 X 射线对微通道壁的穿透效应,此时 MCP 通道材料对 X 射线的吸收效应对 MCP 的能谱响应造成较大的影响.对比图 3(a)和(b),可看出后者有一些元素的吸收边,如 500 eV 和 1800 eV 附近的突变.当然此时金量子效率对能谱响应的影响仍然存在,只是其影响比率有所降低,而多通道效应有所显现.

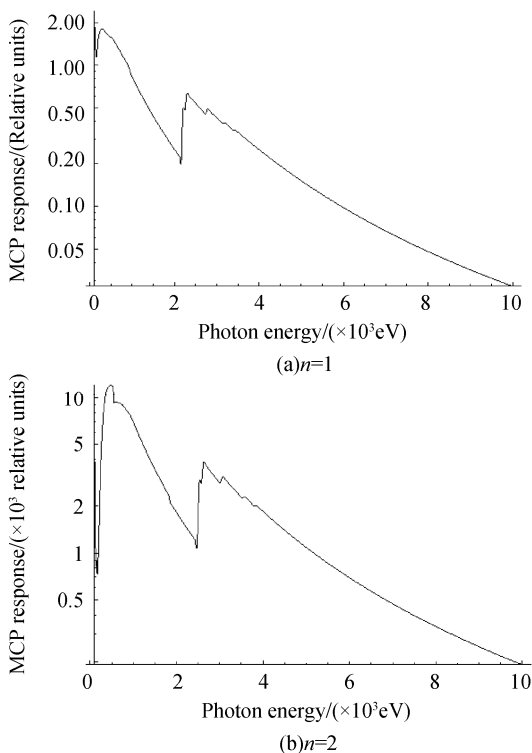


图 3 $\theta=15^\circ, V=392\text{ V}$ 时 MCP 的能谱响应(相对值)
Fig. 3 Response of MCP when $\theta=15^\circ, V=-392\text{ V}$

若取通道数目 $n=10$,入射角 $\theta=15^\circ$,电压 $V=-392\text{ V}$ 时,所得的能谱响应曲线如图 4(归一化到 $E=900\text{ eV}, n=1, \theta=15^\circ, V=-392\text{ V}$ 时的响应

值).此时 MCP 通道材料对 X 射线的吸收效应对 MCP 的能谱响应造成较大的影响,所有铅玻璃材料元素的吸收边都突显出来. MCP 能谱响应度受 MCP 材料的吸收系数影响主要体现在低能段 (4000 eV 以下),曲线突变点均是元素的吸收边引起的,依次是 O-K (548 eV), Pb-N_{VI} (137 eV), Bi-N_{VI} (169 eV), Si-K (1867 eV), Pb-M_V (2471 eV), Pb-M_{IV} (2572 eV), Pb-M_{III} (2991 eV), Pb-M_{II} (3495 eV).同时,对比图 3(b)和图 4 可看出,通道数目越多,则曲线中元素吸收边位置处的变化越锐利,通道材料对 MCP 响应度的影响越显著.

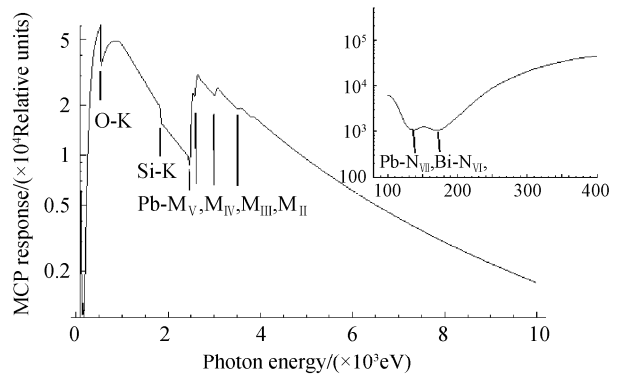
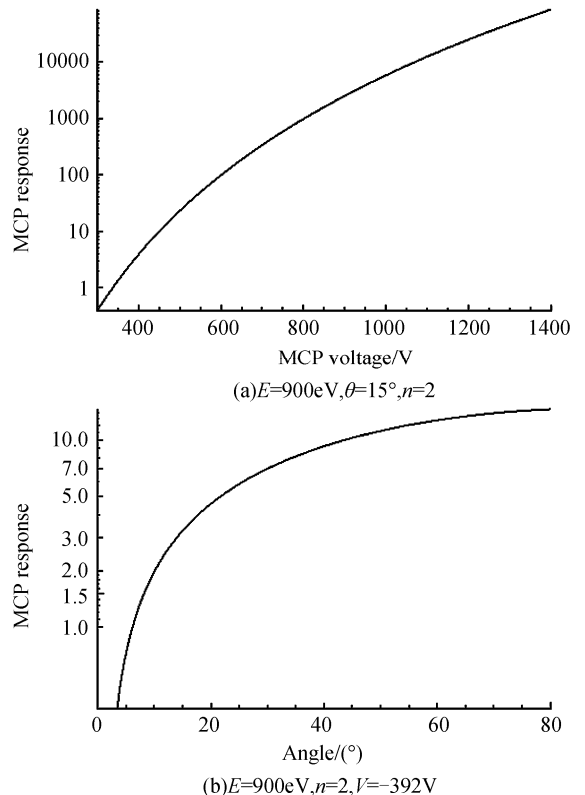


图 4 $\theta=15^\circ, n=10, V=-392\text{ V}$ 时 MCP 的能谱响应(相对值)
Fig. 4 Response of MCP when $\theta=15^\circ, n=10, V=-392\text{ V}$ (Relative)

图 5(a)为取通道数目为 5,入射角为 15° ,入射



(b) $E=900\text{ eV}, n=2, V=-392\text{ V}$

图 5 $E=900\text{ eV}, n=2, \theta=15^\circ, V=-392\text{ V}$ 的能谱响应
 Fig. 5 Response of MCP when $E=900\text{ eV}, \theta=15^\circ, n=2,$
 $V=-392\text{ V}$

光子能量为 900 eV , MCP 输出端电压从 $-300\sim-1400\text{ V}$ 变化时的响应曲线, 由图可看出, 金阴极 MCP 能谱响应随着 MCP 所加偏压的增加而增大, 但实际应用时, 不可能将 MCP 偏压值加到无限大, 因为 MCP 要受到饱和电流的限制, MCP 工作时, 其输出电流必须小于等于 MCP 自身电流的 10% . 因此, 若要提高 MCP 的饱和电流阈值, 可通过改变 MCP 电阻来实现, 这主要体现在 MCP 制作工艺的烧氢还原铅环节, 还原铅层越均匀则 MCP 电阻越小.

图 5(b) 是通道数目为 5, MCP 输出端电压为 -392 V , 入射光子能量为 900 eV , X 射线与微通道轴夹角 θ 从 $0^\circ\sim 80^\circ$ 变化时的能谱响应曲线, 由图可看出, 当入射角小于 3° 时 MCP 响应度近似为 0, 因为此时光线几乎沿着通道轴入射, 大部分 X 射线将直接穿透 MCP 通道而不产生光电子更不会有电子倍增. 当入射角增大时, 更多的 X 射线能照射到 MCP 通道入口的壁上, 此处也镀有金阴极会产生光电子, 且这些地方的光电子更易进入通道中得到倍增. 因此, X 射线的最小入射角应大于 3° .

从图 3(a) 与文献[2]中给出的能谱响应曲线对比可看出, 二者有少许差异. 主要可能是物理模型的不同造成的: 1) 该文献计算光电子产额时所采用的是绝缘阴极材料的 MCP 模型, 而本文所采用的是镀金阴极 MCP 模型, 不同的阴极量子效率导致了最终能谱响应的差异; 2) 该文献提到的 MCP 材料和本工作使用的铅玻璃材料在组成元素及比例上都有差异, 故元素吸收限导致的曲线突变点所处的能点是不一样的.

3 结论

对金阴极 MCP 的能谱响应度的计算应从阴极量子效率, X 射线对 MCP 材料的穿透作用, MCP 微通道对电子的增益等多个方面来分析. 阴极量子效率、多通道效应、微通道壁铅层的光电效应和 MCP 材料元素的吸收边对 MCP 能谱响应都会产生较大影响, 通过分析发现考虑的通道数越多则元素吸收边越锐利; MCP 能谱响应随 MCP 电压的增大而增长, 但不会无限制增大, 因为要考虑 MCP 的饱和效应; MCP 能谱响应还跟入射角度有关系, 当入射光子能量为 900 eV 时, 最小入射角应为 3° .

致谢: 感谢本部的同学和老师给予的帮助, 尤其感谢郝轶聘同学在软件方面的支持!

参考文献

- [1] LANDEN O L, LOBBAN A, TUTT T, *et al.* Angular sensitivity of gated microchannel plate framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, **72**(1):709.
- [2] ROCHAU G A, BAILEY J E, CHANDLER G A, *et al.* Energy dependent sensitivity of microchannel plate detectors[J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, **77**(10):10E323.
- [3] HENKE B L, KNAUER J P, PREMARATNE K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1-10keV photon energy region[J]. *J Appl Phys*, 1981, **52**(3):1509-1520.
- [4] HENKE B L, SMITH J A. 0.1~10 keV X-ray-induced electron emissions from solids-Models and secondary electron measurements[J]. *J Appl Phys*, 1977, **48**(5):1852-1866.
- [5] AN Ji-gang. Ionization radiation detector[M]. Beijing: Atomic Press, 1995:20-32.
安继刚. 电离辐射探测器[M]. 北京: 原子能出版社, 1995:20-32.
- [6] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-Ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\sim 30,000\text{ eV}, Z=1\sim 92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2):181-342.
- [7] CSORBA L P. Current gain parameters of microchannel plates [J]. *J Applied Optics*, 1980, **19**(22):3863-3866.
- [8] EBERHARDT E H. Gain model for microchannel plates[J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(9):1418-1423.
- [9] KILKENNY J D. High speed proximity focused X-ray cameras [J]. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(1):49-69.
- [10] LI Hang, CAO Zhu-rong, ZHAO Zong-qing, *et al.* Calibration of 2~5.5 keV X-ray transmissivity of microchannel plate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(6):973-976.
黎航, 曹柱荣, 赵宗青, 等. 微通道板 2.0~5.5 keV X 射线透过率标定[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(6):973-976.
- [11] MIAO Wen-yong, CHENG Jin-xiu, HU Xin, *et al.* Research on coupling of an X-ray mirror to an X-ray framing camera [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(4):750-753.
缪文勇, 成金秀, 胡昕, 等. X 光分幅相机-平面镜对接方法研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(4):750-753.
- [12] YAN Jin-liang. Operating effectiveness of electron transmission film at the input of MCP[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(2):164-166.
闫金良. 微通道板电子透射膜的工作特性[J]. 光子学报, 2004, **33**(2):164-166.
- [13] YANG Wen-zheng, TIAN Jin-shou, HOU Xun, *et al.* Spatially research of picosecond X-ray multiframes camera with gated microchannel plate [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(12):2209-2214.
杨文正, 田进寿, 侯洵, 等. 微通道板行波选通 X 射线皮秒分幅相机动态空间分辨率的优化[J]. 光子学报, 2007, **36**(12):2209-2214.
- [14] YANG Wen-zheng, HOU Xun, BAI Yong-lin, *et al.* Uniform design method of the exposure time of X-ray picoseconds framing camera with gated microchannel plate [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(3):439-443.

杨文正,侯洵,白永林,等.微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机曝光时间的均匀设计[J].光子学报,2008,37(3):439-

443.

Study on the Energy Dependent Response of Microchannel Plate with Gold Evaporated

YUAN Zheng^{1,2}, LIU Shen-ye¹, XIAO Sha-li², CAO Zhu-rong¹, LI Hang¹, WANG Li-wei^{1,2}

(1 *Reserch Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

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

Abstract: The theoretics of gold evaporated coated MCP detectors' energy dependent response within 0.1~10 keV was studied. It was calculated from several aspect, such as the quantum efficiency of photocathode, the attenuation of X-ray in the channel material, the photoemission of Pb on the channel wall and the gain of MCP (Microchannel Plate). Theoretic expressions of the response of Au evaporated coated MCP as well as its simulative curve were worked out. If consider one channel only, when the gain is 1, then the response depend on the quantum efficiency of Au cathode. Else if consider the multichannel effects, the response will break at the photoinization edges of the elements of MCP channel material. Simultaneously, the relations of the MCP response to the voltage and the incidence angle are analyzed. The MCP response increases as the voltage accretion. The least incidence angle should be 3° at 900 eV.

Key words: Microchannel plate (MCP); Energy dependent response; Photoemission; Au cathode; Quantum efficiency



YUAN Zheng was born in 1984. She will get her M. S. degree from the Photoelectric Engineering College of Chongqing University. Her research field is phenomenon of photoemission.