

doi:10.3788/gzxb20174605.0523001

平响应 X 射线光阴极的理论设计与计算模拟

王传珂^{1,2}, 李晋¹, 杨鸣³, 王保清^{1,3}, 李廷帅³, 易涛¹, 刘慎业¹

(1 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

(2 中国工程物理研究院 惯约实施管理中心, 四川 绵阳 621900)

(3 电子科技大学 能源科学与工程学院, 成都 611731)

摘 要:给出了适用于 0.1~5 keV 的平响应 X 射线光阴极的设计方案. 采用两层不同厚度、相同面积的不同金属材料制备 X 射线光阴极, 两金属层的厚度和微观结构经过优化后, 在惯性约束聚变实验感兴趣的能区具有良好的平响应特征, 不需要复杂的解谱过程. 选取 4 种不同的光阴极材料, 改变厚度和占空比设计, 计算得到了光阴极不平整度. 模拟结果表明, 该光阴极在 0.1~5 keV 能量响应基本一致, 不平整度优于 5%.

关键词:惯性约束聚变; X 射线; 条纹相机; 透射式光阴极; 平响应 X 射线光阴极

中图分类号: TL817

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0523001-6

Theoretical Design and Computational Simulation of Flat Response X-ray Photocathode

WANG Chuan-ke^{1,2}, LI Jin¹, YANG Ming³, WANG Bao-qing^{1,3},
LI Ting-shuai³, YI Tao¹, LIU Shen-ye¹

(1 *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

(2 *Management Center of Inertial Confinement, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621900, China*)

(3 *School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 611731, China*)

Abstract: A flat-response X-ray photocathode at the energy range of 0.1~5 keV was presented. The photocathode consists of two layers of metal material with same area and different thickness. After optimizing the thickness and microstructure of two metal layers, the proposed photocathode does not need complex corrections in the interested X-ray energy range of inertial confinement fusion experiment due to the flat-response characteristics. The flatness of the proposed X-ray photocathode with 4 kinds of materials respectively was simulated by adjusting the material, thickness and duty ratio. The simulation results show that the proposed photocathode has flat-response with flatness better than 5% at the X-ray energy range of 0.1~5 keV.

Key words: Inertial confined fusion; X-ray; Streak camera; Transmission photocathode; Flat-response X-ray photocathode

OCIS Codes: 230.5160; 040.7480; 120.1880

0 引言

在激光和 Z 箍缩惯性约束聚变(Inertial Confined Fusion, ICF)研究^[1-2]中, X 射线绝对强度和光谱的测

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11405158, 11435011)资助

第一作者: 王传珂(1981-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为激光聚变诊断技术. Email: wck1981@caep.cn

通讯作者: 李晋(1987-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为 X 射线时空诊断技术. Email: jinli1025@gmail.com

收稿日期: 2016-11-14; 录用日期: 2017-02-13

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

量对于理解等离子体发生发展的过程、校验流体力学模拟程序十分重要. 软 X 射线的精密化测量有利于更好地理解等离子体相互作用、等离子体状态参量和核聚变过程中的重要物理特性. 在美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF)^[3-4]、中国神光三号激光装置^[5-6]、聚龙一号 Z 箍缩实验平台 (Primary Test Stand, PTS)^[7] 上开展的 ICF 研究中, 都迫切需要建立高时间分辨的 X 射线辐射流测量技术.

X 射线条纹相机具有皮秒量级的时间分辨和微米量级的空间分辨, 是研究 X 射线辐射高速瞬变过程的重要诊断设备. 在 ICF 实验研究中, X 射线条纹相机与透射光栅^[8-9]、KB 显微镜^[10]、晶体^[11-12] 等配合, 可以测量辐射能谱的时间演化行为, 已被广泛应用在 ICF 实验中 X 射线的能流测量, 对于理解 X 射线产生、吸收和能量输运至关重要.

传统的 X 射线条纹相机光阴极基于光电效应设计, 能量响应曲线十分复杂, 不具有平响应性^[13-14]. 实验前必须对光阴极进行宽谱范围的标定^[15-16], 获得其能量响应曲线. 光阴极能量响应曲线的标定工作十分复杂. 在用于定量化测量时, 需要通过复杂的解谱函数或解谱程序进行数据处理, 不可避免地带来数据测量的不确定度. 具有平响应特征的 X 射线条纹相机光阴极的研制需求十分迫切.

本文提出了适用于 0.1~5 keV 能区的平响应 X 射线光阴极的设计方案. 这种光阴极在 ICF 实验感兴趣的能区具有良好的平响应特征, 不需要复杂的解谱过程. 采用这种平响应光阴极替代传统光阴极, 能够实现条纹相机的平响应, 可以有效提升获取数据的精确度, 加深对激光等离子体相互作用的理解和认识.

1 平响应光阴极的理论设计

Henke^[17-21] 针对软 X 射线光阴极在 0.1~10 keV 能量范围内的光电发射机理, 提出了光阴极光电发射“激励、输运和逸出”三阶段模型. 在激励(初级电子产生)阶段, 通过激发过程和电离过程, 入射的软 X 射线能量在阴极材料内沉积; 阴极材料的原子受到激发和电离, 释放出动能与光电电子相当的俄歇电子和一级电子. 在输运(初级电子输运)阶段, 少量的初级电子(弹性散射光电电子和俄歇电子)直接逸出光阴极表面; 大量的初级电子则由于能量高且反应截面大, 在阴极材料内部输运时, 与阴极内的原子不断碰撞转移能量, 产生大量低能二次电子. 在逸出(二次电子发射)阶段, 一部分低能二次电子通过电子-电子碰撞或电子-声子碰撞输运到阴极后表面, 最后克服表面势垒后逸出.

Henke 给出透射式光阴极量子效率 Y_b 的计算公式为^[17]

$$Y_b = K' \rho E \mu(E) \lambda_s e^{-t/\lambda_x} (1 - e^{-t/\lambda_s}) \quad (1)$$

式中, K' 为常量, ρ 为光阴极材料密度, E 为入射光子能量, $\mu(E)$ 为光阴极材料对入射光的质量吸收系数, λ_s 为电子的逸出深度, t 为光阴极材料厚度, λ_x 为光阴极材料对 X 射线质量吸收长度. 可以看出, 光阴极量子效率与光阴极的材料密切相关.

整体式平响应 X 射线光阴极的理论设计主要依据 Henke 建立的光电阴极数学模型. 透射式光阴极的谱响应(也称谱灵敏度) R 为量子效率 Y 与入射能量 E 的比值, 可写为

$$R_{(E)} = K' \rho \mu_{(E)} \lambda_s e^{-t/\lambda_x} (1 - e^{-t/\lambda_s}) \quad (2)$$

对于某种固定的光阴极材料, K' 为常量, 材料密度 ρ 、材料对入射光的质量吸收系数 $\mu_{(E)}$ 、 ρ 和电子逸出长度 λ_s 均为固定值. 实际情况下选用的光阴极材料的厚度远大于电子逸出长度 λ_s , 也大于最优化厚度 t_{opt} . 在这种情况下, $1 - e^{-t/\lambda_s}$ 约等于 1, 可忽略. 因此, 只有 e^{-t/λ_x} 影响透射式阴极的谱响应. 即当阴极的材料确定后, 其谱响应只与厚度 t 有关, 改变光阴极的厚度, 会对光阴极谱响应产生较大影响.

根据式(1)和(2)可以计算得到不同厚度的光阴极的谱响应, 可以看出, 较薄的光阴极的谱响应曲线随 X 射线能谱呈降低趋势, 而较厚的光阴极的谱响应曲线则随 X 射线能谱呈增加趋势; 两者的谱响应曲线具有“互补”性. 因此, 通过组合不同厚度的光阴极, 并调节其占空比, 可以使得光阴极在较宽能区具有良好的平响应, 响应不平整度优于 15%, 甚至更优, 从而满足 ICF 精密诊断的需要.

整体式平响应光阴极^[22] 采用两层不同厚度、相同面积的不同金属材料作为发射体, 如图 1. 厚度分别为 t_1 和 t_2 ($t_1 < t_2$), 作为 X 射线发射体的两金属层在横向上的尺寸完全相同, 厚金属层具有均匀分布的任意形状微孔结构, 而薄金属层则没有. 两金属层的直径均为 Φ_1 . 其具体大小由设计的光阴极最大尺寸 Φ_0 决定 ($\Phi_1 \geq \Phi_0$). 厚金属层的微孔尺寸 Φ_2 可根据实际需求而改变, 需要考虑微纳米加工技术水平确定. 加工时, 采用与亚微米光栅类似的制备工艺^[23], 可以保证微孔侧壁陡直度好于 86° . 所有微孔的面积与厚金属层的面积

之比(占空比)为 a_1 , 这样厚薄两种阴极材料所占比例分别为 a_2 ($a_2=1-a_1$) 和 a_1 .

这种设计的优点在于,一方面可以保证通过改变厚金属层微孔的尺寸和间距实现两金属层的纵向面积调整,另一方面,厚金属层微观上存在规则分布,可以保证在实验标定和应用时固定的 X 射线权重分配.

由透射式金属阴极的光电发射模型可知,阴极的整体能量响应函数 $S_{(E)}$ 为

$$S_{(E)} = \rho u_{(E)} \lambda_s \{ [1 - e^{-(t_1)/\lambda_s}] \times a_1 e^{-t_1/\lambda_x} + [1 - e^{-(t_1+t_2)/\lambda_s}] \times a_2 e^{-(t_1+t_2)/\lambda_x} \} \quad (3)$$

式中, $S_{(E)}$ 为材料对能量为 E 的 X 射线的质量吸收系数, λ_s 为电子在材料中的平均自由程, λ_x 为 X 射线在材料中的衰减长度,对于某一特定的金属材料, $\rho, u_{(E)}, \lambda_s, \lambda_x$ 都为已知量.

光阴极的整体谱响应函数的不平整度 $S_{(E)}$ 由其方差 σ 决定,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\int_{E_1}^{E_2} (S - \bar{S})^2 dx}{(E_2 - E_1) \bar{S}^2}} \quad (4)$$

式中, E_2, E_1 分别为能区的上下限, $\bar{S} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} S(x) dx}{(E_2 - E_1)}$, 如此对于需要实现平响应的 X 射线波段,寻找合适的 t_1, t_2, a_1 使 σ 达到所需的不平整度要求,可实现阴极在所需能区的平响应设计.

2 平响应光阴极的计算模拟

根据式(3)和(4),可以开展整体式平响应 X 射线光阴极理论计算,其步骤为:

- 1) 选取光阴极的材料,从 XOP 程序中可以得到所需的各种金属材料的参量,包括密度 ρ 、在 100~5 000 eV 能区对应的 X 射线的质量吸收系数 $u(E)$ 、电子在金属中平均自由程 λ_s 和 X 射线对于金属的衰减长度 λ_x . 碱金属光阴极和 Au 阴极在紫外能区和软 X 射线能区谱灵敏度较高,是 X 射线光阴极的优选材料;
- 2) 编写阴极的整体谱响应公式 $S(E)$ 和不平整度公式 σ ,将 1) 中各参量和能区上下限 5 000 eV 与 100 eV 代入式(3)和(4);
- 3) 改变光阴极厚度 t_1 和 t_2 ,以及占空比 a_1 ,计算出相应的 $S_{(E)}$ 和 σ . 当 σ 的值达到所需的不平整度,且 $S_{(E)}$ 较高时,即实现了阴极的平响应设计.

按照类似的计算方法,可以遴选出适合于 ICF 实验诊断的光阴极的设计方案,结合光阴极的制备技术基础(即考虑光阴极的微加工能力和难度),可以最终确定整体式平响应 X 射线光阴极的设计方案.

选取 4 种不同的光阴极材料,分别是 Pd (钯, $Z=46$)、Ag (银, $Z=47$)、Pt (铂, $Z=78$)、Au (金, $Z=79$),改变厚度和占空比设计,在不同设计方案下,计算得到了光阴极在 100~5 000 eV 范围内的不平整度,结果如图 2. 表 1 汇总了相同设计(厚度、占空比)情况下,不同材料光阴极的不平整度结果,可以看出,在方案 B、D、E、F 条件下,对于 Pt、Au 两种阴极材料,均可以实现较为理想的平响应. 其中在方案 E 条件下,当 Au 阴极厚度分别设计为 50 nm 和 40 0nm, a_1 为 1/7 时,透射式光阴极在 100~5 500 eV 能区内谱灵敏度的不平整度可获得最小值,为 4.64%.

需要说明的是,在合适的设计参量下, Pd、Ag 也可以实现较好的平响应. 但由于 Pd 硬度较高,难于加工;而 Ag 易氧化,稳定性不好. Pt 性能与 Au 相当,但价格较为昂贵,故在实际设计和制作中选择 Au 为首选材料.

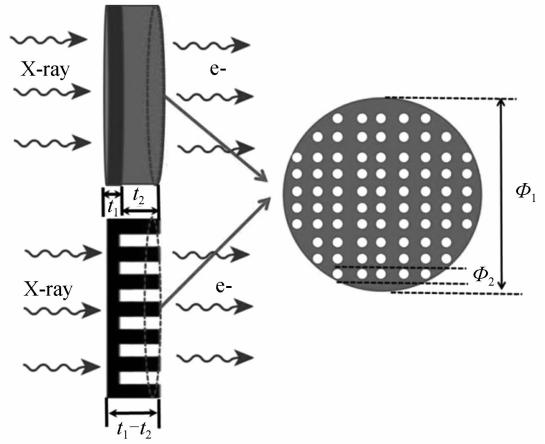


图 1 整体式平响应光阴极设计

Fig. 1 Design of integral flat-response photocathode

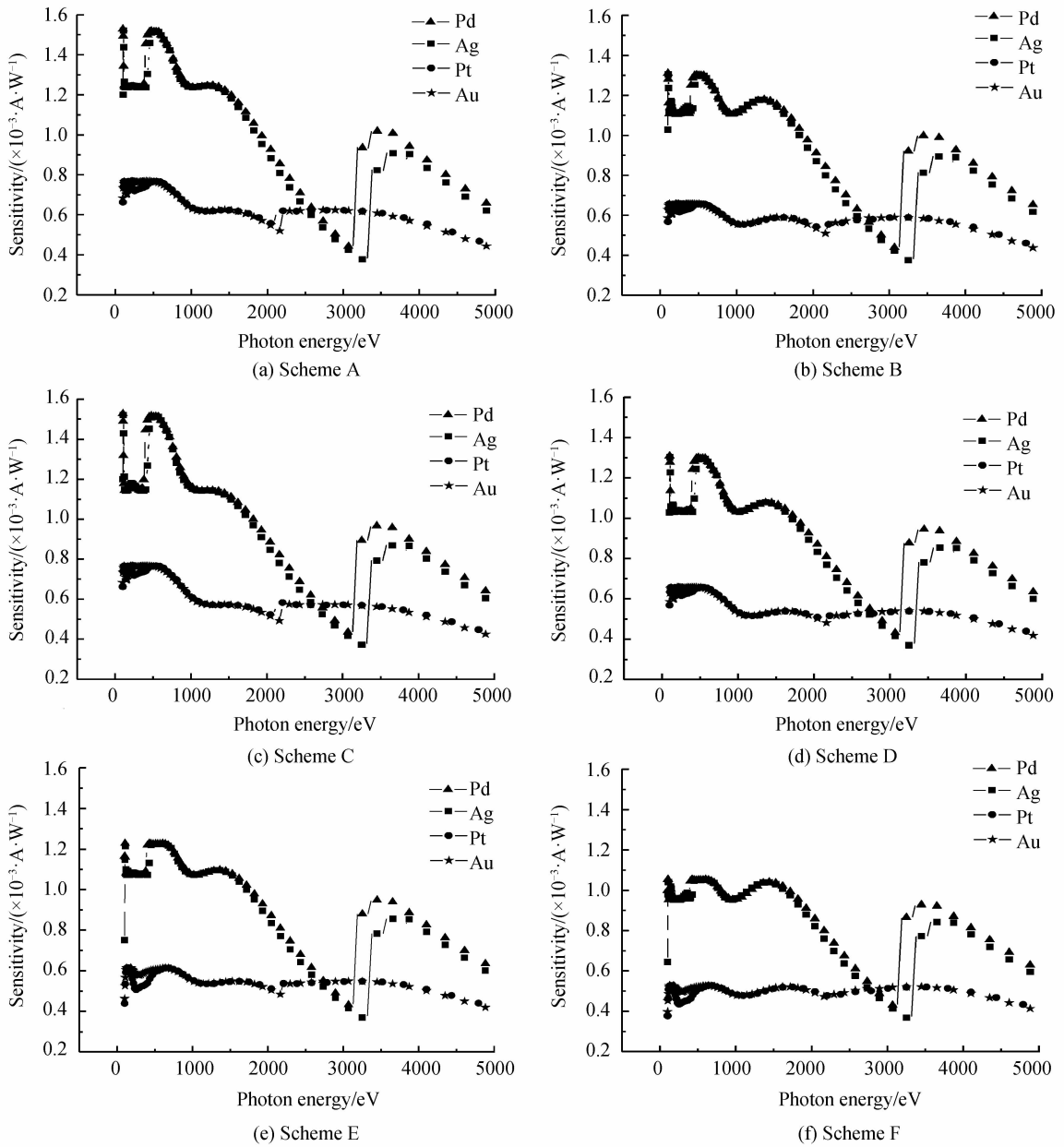


图2 不同方案的响应曲线

Fig. 2 Response curves of different schemes

表1 相同设计情况下,不同材料光阴极的不平整度

Scheme of the flat-response photocathode	$\sigma(\text{Pd})$	$\sigma(\text{Ag})$	$\sigma(\text{Pt})$	$\sigma(\text{Au})$
A($t_1=40$ nm $t_2=360$ nm $\alpha_1=1/6$)	24.97%	22.31%	12.4%	11.54%
B($t_1=40$ nm $t_2=360$ nm $\alpha_1=1/7$)	21.57%	18.65%	8.17%	7.43%
C($t_1=40$ nm $t_2=400$ nm $\alpha_1=1/6$)	25.63%	23.34%	15.25%	14.38%
D($t_1=40$ nm $t_2=400$ nm $\alpha_1=1/7$)	21.81%	19.33%	11.11%	10.48%
E($t_1=50$ nm $t_2=400$ nm $\alpha_1=1/6$)	21.28%	18.33%	7.54%	7.32%
F($t_1=50$ nm $t_2=400$ nm $\alpha_1=1/7$)	18.18%	14.99%	6.24%	4.64%

3 模拟结果与分析

3.1 相同设计情况下,不同材料光阴极的不平整度结果

对方案 A 和方案 B 进行比对分析. 方案 A 和方案 B 光阴极薄厚两层厚度的配比相同(均为 40 nm+360 nm),但占空比不同. 由图 2(a)和(b)可以看出,在金属厚度相同的情况下,占空比不同,光阴极的灵敏度

不同. 方案 B(占空比为 1/7)情况下,四种不同材料光阴极的响应灵敏度在 1~5 000 eV 范围内整体上低于方案 A(占空比为 1/6). 以 Au 光阴极为例,方案 B 设计下,Au 光阴极在 500 eV 附近的响应灵敏度约为 6.6×10^{-3} ,而方案 A 设计下,Au 光阴极在 500 eV 附近的响应灵敏度约为 7.9×10^{-3} . 虽然方案 B 的响应灵敏度不如方案 A 的高,但方案 B 的响应灵敏度不平整度为 7.43%,优于方案 A 的 11.54%.

类似地,方案 C 和方案 D 光阴极薄厚两层厚度的配比均为 40 nm+400 nm,但占空比不同. 方案 D 的响应灵敏度不如方案 C 的高,但方案 D 的响应灵敏度不平整度为 10.48%,优于方案 C 的 14.38%. 方案 E 和方案 F 光阴极薄厚两层厚度的配比均为 50 nm+400 nm,但占空比不同. 方案 F 的响应灵敏度不如方案 E 的高,但方案 F 的响应灵敏度不平整度为 4.64%,优于方案 E 的 7.32%.

对 A、C、E 三种方案进行比对分析. 三种方案占空比均为 1/7,但阴极薄厚两层厚度的配比(方案 B 为 40 nm+360 nm、方案 D 为 40 nm+400 nm、方案 E 为 50 nm+400 nm)不同. 由图 2(a)、(c)、(e)可以看出,以 Au 光阴极为例,方案 A 设计下,Au 光阴极在 500 eV 附近的响应灵敏度约为 7.9×10^{-3} 、方案 C 设计下,Au 光阴极在 500 eV 附近的响应灵敏度约为 7.6×10^{-3} 、方案 E 设计下,Au 光阴极在 500 eV 附近的响应灵敏度约为 6.0×10^{-3} . 三个方案中方案 E 的响应灵敏度不平整度最佳为 7.32%,方案 A 次之为 11.54%,方案 C 最差为 14.38%.

类似地,可以对 B、D、F 三种方案进行比对分析. 三种方案占空比均为 1/6,但阴极薄厚两层厚度的配比不同. 三个方案中方案 F 的响应灵敏度不平整度最佳为 4.64%,方案 B 次之为 7.43%,方案 D 最差为 10.48%.

3.2 不同占空比情况下,光阴极的不平整度结果

图 3 给出了固定阴极材料和厚度的情况下,不平整度和占空比(孔与整个面积的比值)的关系. 由图 3 可以看出,固定两金属层厚度后,Au 光阴极不平整度呈现先急剧下降后缓慢上升的趋势. ICF 诊断精密化要求平响应光阴极的设计一般要满足不平整度小于 10%. 另外从图中可以看出,当 Au 阴极薄厚两层分别设计为 40 nm 和 400 nm 时,占空比在 5.4%至 13.4%范围内,均可以满足不平整度小于 10%的设计要求;当 Au 阴极薄厚两层分别设计为 50 nm 和 450 nm,占空比在 8.4%至 16.3%范围内,也可以满足不平整度小于 10%的设计要求.

当 Au 阴极薄厚两层分别设计为 40 nm 和 400 nm 时,曲线最低点 α_1 为 10.6%, α_2 为 89.4%,即为最优占空比设计. 该设计条件下,透射式光阴极在 100~5 500 eV 能区内谱灵敏度的不平整度可获得最小值,为 5.405%. 当 Au 阴极薄厚两层分别设计为 50 nm 和 450 nm 时,曲线最低点 α_1 为 12.1%, α_2 为 87.9%,透射式光阴极在 100~5 500 eV 能区内谱灵敏度的不平整度可获得最小值,为 4.707%.

4 结论

本文在总结 X 射线光阴极光电发射原理和数学模型的基础上,给出了一种透射式平响应 X 射线光阴极的设计方法. 选取四种不同的光阴极材料,分别是 Pd ($Z=46$)、Ag ($Z=47$)、Pt ($Z=78$)、Au ($Z=79$),改变厚度和占空比设计,在不同设计方案下,计算得到了光阴极不平整度. 计算表明,通过设计,可以实现不平整度优于 5%.

与传统光阴极相比,透射式平响应 X 射线光阴极可在所需能区内具有平响应特性,解决因透射式 X 射线光阴极具有复杂的能量响应而导致的探测器无法定量化测量未知物理量的问题. 通过实现对 X 射线条纹相机的阴极平响应化研究可将条纹相机用于对辐射流的诊断,时间分辨可达 10 ps 以上,对激光聚变点火黑腔优化设计、内爆整形脉冲设计均具有应用价值.

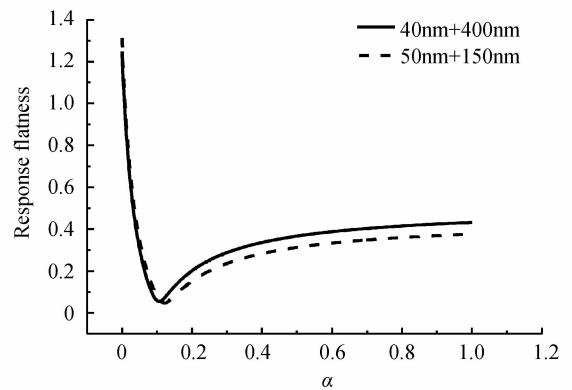


图 3 Au 光阴极不平整度和占空比的关系
Fig. 3 Relationship between the unevenness of Au photocathode and duty cycle

参考文献

- [1] LINDL J D, Inertial confinement fusion: the quest for ignition and energy gain using indirect drive[M]. New York: American Institute of Physics Press, 1998:12-16.
- [2] MOSES EI, DIAZDEKA RT, STORM E, *et al.* A sustainable nuclear fuel cycle based on inertial fusion energy[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, **56**(2): 547-565.
- [3] LINDL J D, MOSES E I. Special topic: plans for the national ignition campaign (NIC) on the national ignition facility (NIF): on the threshold of initiating ignition experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, **18**(5): 050901.
- [4] EDWARDS M J. The experimental plan for cryogenic layered target implosions on the national ignition facility—the inertial confinement approach to fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, **18**(5): 051003.
- [5] ZHENG Wan-guo, ZHANG Xiao-min, WEI Xiao-feng, *et al.* Status of the SG-III solid-state laser facility[J]. *Journal of Physic*, 2008, **112**: 0320009.
- [6] ZHENG Wan-guo, DENG Ying, ZHOU Wei, *et al.* Development of laser technology in research center of laser fusion [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(12): 3082-3090.
郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(12): 3082-3090.
- [7] DENG J, XIE W, FENG S, *et al.* From concept to reality—a review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, **1**(1): 48-58.
- [8] RONALD E B. Exploiting a transmission grating spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(10): 4158-4161.
- [9] EAGLETON R T, JAMES S F. Transmission grating streaked spectrometer for the diagnosis of soft x-ray emission from ultrahigh intensity laser heated targets[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(10): 3969-3973.
- [10] GOTCHEV O V, JAANIMAGI P A, KNAUER J P, *et al.* High-throughput, high-resolution Kirkpatrick-Baez microscope for advanced streaked imaging of ICF experiments on OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**: 2178-2181.
- [11] AGLITSKIY Y, LEHECKA T, OBENSCHAIN S, *et al.* X-ray crystal imagers for inertial confinement fusion experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, **70**(1): 530-532.
- [12] ROBBINS D L, CHEN H, FAENOV A Y, *et al.* High resolution compact Johann crystal spectrometer with the Livermore electron beam ion trap[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(10): 3717-3719.
- [13] SPICER W E, HERRERA G A. Modern theory and applications of photocathode[C]. SPIE, 1993, **2022**: 18-33.
- [14] ANTON S, OSWALD T, SIEGMUND H W. The quantum efficiency and stability of UV and soft X-ray photocathodes [C]. SPIE, 2005, **5920**: 1-13
- [15] ZENG Peng, YUAN Zheng, DENG Bo, *et al.* Spectral response calibration of Au and CsI transmission photocathodes of X-ray streak camera in a 60 - 5500 eV photon energy region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(15): 155209.
曾鹏, 袁铮, 邓博, 等. 软 X 射线条纹相机透射式 Au 与 CsI 阴极灵敏度标定[J]. *物理学报*, 2012, **61**(15): 155209.
- [16] LI Yu-kun, CHEN Tao, DENG Bo, *et al.* Energy spectral response of photocathode for soft X-ray streak camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(2): 022002.
黎宇坤, 陈韬, 邓博等. 软 X 射线条纹相机光阴极能谱响应灵敏度[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**(2): 022002.
- [17] HENKE B L, SMITH J A, ATTWOOD D T. Secondary electron energy distributions for gold as excited by C K α (277 eV) and Al K α (1487 eV) x rays[J]. *Applied Physics Letters*, 1976, **29**(9): 539-541.
- [18] HENKE B L, SMITH J A, ATTWOOD D T, *et al.* 0.1-10-keV x-ray-induced electron emissions from solids—Models and secondary electron measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, **48**(5): 1852-1866.
- [19] STRADLING G L, MEDECKI H, KAUFFMAN R L, *et al.* Relative responses of CsI and Au photocathodes to 70-ps, 500-eV x-ray pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1980, **37**(9): 782-784.
- [20] HENKE B L. The characterization of x-ray photocathodes in the 0.1-10-keV photon energy region[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, **52**(3): 1509-1520
- [21] HENKE B L, LIESEGANG J, SMITH S D. Soft-x-ray-induced secondary-electron emission from semiconductors and insulators: Models and measurements[J]. *Physical review B*, 1979, **19**(6): 3004.
- [22] WANG Chuan-ke, LI Jin, HU Xin, *et al.* Realization of a flat-response photocathode for x-ray streak cameras[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(15): 19793-19798.
- [23] MENG Xiang-feng, LI Li-feng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189-193.
孟祥峰, 李立峰. 提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189-193.