

X 射线二极管的灵敏度标定和应用

马洪良 孙可煦 徐和平 郑志坚 刘忠礼 唐道源
(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

摘 要 阐述了 X 射线二极管铝阴极光电转换量子效率, 并在单色亚千 X 射线光源装置上对铝阴极的灵敏度进行了绝对标定, 最后介绍了采用 X 射线二极管(AI)探头来测量激光-等离子体相互作用中产生的亚千 X 射线能量。

关键词 X 射线二极管, 铝阴极, 灵敏度。

1 引 言

在间接驱动惯性约束聚变实验研究中, 对于 X 射线辐射场的研究尤为重要^[1~3]。强激光照射到靶面, 激光能量被吸收形成一个高温等离子体区, 发射 X 射线, X 射线能量绝对测量的主要诊断仪器是由不同滤片——X 射线二极管(AI)组成的阵列(亚千 X 射线能谱仪)^[4, 5], 因此, 对于 AI 阴极光电转换量子效率的研究和灵敏度的绝对标定十分重要。

2 铝阴极光电转换理论考虑

X 射线激发的电子谱包括电子激发、输运和逃逸过程。X 射线束入射到 AI 阴极表面激发的电子谱特征结构如图 1 所示, 图中两峰是光电子和俄歇(Auger)电子“无损失”线, 沿低能二次电子发射方向与两峰相连接的是它们特征能量损失的尾部结构^[6]; 二次电子峰值为 1.3 eV, 半宽度为 4.2 eV^[7]。能量为 0~30 eV 的二次电子占总激发电子的大部分。

2.1 “无损失”光电子

X 射线产生的“无损失”电子发射的激发-发射几何关系如图 2 所示。假设由于弹性碰撞

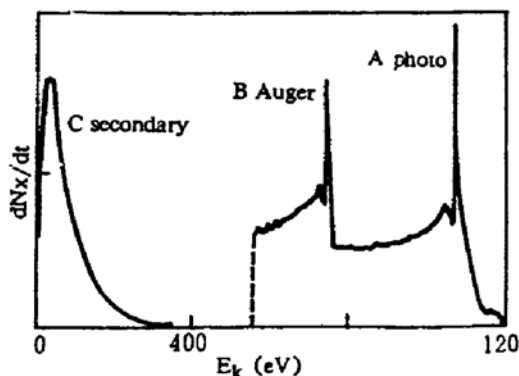


Fig. 1 X-ray-excited photoemission from Al cathod

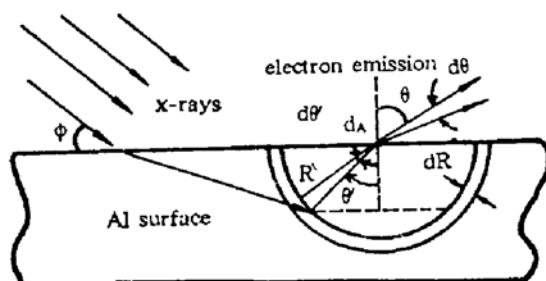


Fig. 2 Excitation-emission geometry for x-ray-induced "no-loss" electron emission

逃逸 θ' 圆锥体的光电子数目等于弹性碰撞进入锥体内的光电子数目。单位时间沿 θ' 方向到达 dA 面元上的光电子数目 d^4N/dt 表示为:

$$\frac{d^4N}{dt} = I_0 T \frac{\sin \phi}{\sin \phi'} \exp \left[-\frac{\mu \rho R \cos \alpha'}{\sin \phi'} - \frac{R}{\lambda_q} \right] \rho \left(\frac{d\sigma_{n,i}}{d\omega} \right) \frac{DA \cos \theta'}{R^2} (2\pi R^2 dR \sin \theta' d\theta) \quad (1)$$

式中 d^4N 表示光电子数目对时间、面元、方向和立体角的四次求导, I_0 为平行单色 X 射线强度 (photon/sec · cm²) $T = 1 - R(\phi)$, $R(\phi)$ 为入射线的菲涅尔(Fresnel)反射系数, 仅当入射角 ϕ 接近或小于临界角时, $R(\phi)$ 不为 0; $\sin \phi/\sin \phi'$ 表明当光子折射进入阴极时光束截面的减少, 指数因子是 X 射线在特定立体角内到达体元 dV 的概率与光电子到达表面面元 dA 的概率的乘积; $(\mu\rho)^{-1}$ 是 X 射线衰减长度, μ 为质量吸收系数, ρ 为阴极密度; λ_q 为特定光子的非弹性碰撞平均自由程; 因子 $\rho(d\sigma_{n,i}/d\omega)$ 表示 θ' 附近单位立体角单位体积产生的光电子数目, $d\sigma_{n,i}/d\omega$ 为微观质量光电离截面; $\exp(-R/\lambda_q)$ 为“复活”几率; $dA \cos \theta'/R^2$ 为立体角在面元 dA 上的投影。

不考虑临界角附近入射情况, 铝阴极表面上 X 射线反射和折射效应可以省略, 即 $T' = 1$, $\phi = \phi'$ 。此外, X 射线穿透深度远大于光电子逃逸范围, 因此, $\mu\rho\lambda_q \cos \theta' \ll \sin \phi'$, 由(1)式对变量 $R(0 \sim \infty)$ 积分得到:

$$\frac{d^3N}{dt da} = I_0 \left(\frac{d\sigma_{n,i}}{d\omega} \right) \rho \lambda_q (2\pi \sin \theta' \cos \theta' d\theta') \quad (2)$$

式中 d^3N 表示光电子数目对时间、方向和立体角的三次求导。当电子离开表面时折射偏离法线, 假设阴极内势能 V_0 , 动能为 eV_0 , 表面上光电子动能为 E_i , 根据表面横向动量守恒^[7]得到阴极表面光电子强度 $d^3N/dt \cdot d\Omega \cdot dA$:

$$\frac{d^3N}{dt dA d\Omega} = B_r \cos \theta \quad (3)$$

式中 B_r 是“无损失”光电子的光学亮度。

2.2 “无损失”俄歇电子

X 射线能量沉积的机制首先是光电过程, 对于给定的光子能量, 最内层能级的光电离截面最大, 这样能够激发电子进入连续态, 大部分光子能量首先参与原子的激发, 余留的光子能量成为被激发光电子的动能。紧接着退激化和竞争过程, 发射荧光和俄歇电子。对于低能 X 射线, 俄歇过程是主要的。俄歇电子和荧光发射分布是各向同性的^[8]。俄歇电子发射强度^[7]由下式给出:

$$d^3N_A/dtdAd\Omega = B_A \cos \theta \quad (4)$$

式中 B_A 为俄歇电子的光学亮度。

2.3 “无损失”二次电子

首先, X 射线激发的大部分光电子和俄歇电子具有很快的速度, 与原子外层电子和传导电子的耦合很弱, 因此, 直接激发能量很低的二次电子。此外, 快电子经过等离子体元激发而被吸收, 紧接着又反过来衰变产生二次电子或光子^[9,10]。

当快电子能量下降与二次电子能量(小于 100 eV)相当时, 更多的直接碰撞产生二次电子, 这种电子-电子碰撞导致较大的能量损失。最后, 当产生的二次电子逃逸到表面时, 一些二次电子不能逃逸出来, 但将雪崩成为不同能量分布的二次电子, 其中一些具有足够的能量逃逸出表面^[11]。“无损失”二次电子逃逸出表面的强度由下式给出:

$$d^4N_s/dE dt dA d\Omega = B_s \cos \theta \quad (5)$$

B_s 为二次电子的光学亮度。

每个光子转换为二次电子发射的时间展宽为 10^{-14} s 量级^[12], 能量范围为几十电子伏, 因此 X 射线光电探测器具有飞秒量级的时间分辨。

X 射线光电转换发射电子为 X 射线能量诊断提供了一个重要的可得途径。X 射线光电探测器是无窗真空仪器, 能够有效地测量较宽的光子能量。

3 实验标定装置的标定结果

在强束流带电粒子(质子)激发 X 光光源装置上绝对标定铝阴极灵敏度, 标定装置示意图如图 3 所示。图中 K-400 高压倍加器加速质子束流(~ 270 kV, ~ 1 mA), 轰击靶材料, 发射特征(L 边和 K 边)荧光, 表 1 给出了六种不同靶材料的荧光特征能量。

Table 1. X-ray energy and source intensities of six different materials

target	X-ray energy (eV) E_λ	source intensity (photon/second)
B(K)	183	2.83×10^{13}
C(K)	282	3.79×10^{13}
Ti(L)	452	1.18×10^{13}
Cr(L)	574	9.91×10^{12}
Fe(L)	704	3.09×10^{12}
Cu(L)	932	3.03×10^{12}

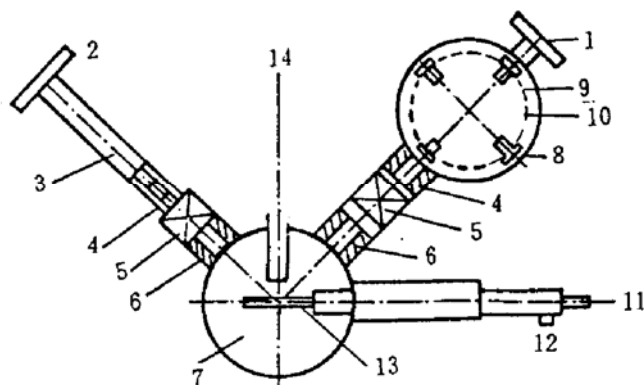


Fig. 3 The facility schematic calibrating the sensitivity of Al cathods

1, 2. proportional, 3. beam drift tube, 4. filter, 5. vacuum valve, 6. magnet, 7. target chamber, 8. detector, 9. rotating table, 10. detector chamber, 11. inflow water, 12. outflow water, 13. target, 14. proton beam

单色亚千 X 射线光源装置由靶室和探测室组成^[13], 中间用真空管道联接。靶室和探测室各有一个通道, 放置流气式正比计数管监测 X 射线光源强度, X 射线二极管(Al)探头安装在探测室转盘上。

质子束流轰击特征靶, 发射 X 射线, 然后通过永久磁铁偏离带电粒子, 再经过栏准直且限制散射光子, 最后通过滤片消除中性粒子, 得到一个单色性好且干净的 X 射线光源。

标定时将 X 射线二极管(Al)探头转到通道位置, 利用 J350 型电流计记录关闭中间阀前后时刻的电流, 其铝阴极的灵敏度 S 为:

$$S = \frac{I(h\nu) - i_0}{\phi(h\nu) h\nu \Delta\Omega \eta} \quad (6)$$

式中 $I(h\nu)$ 表示对能量为 $h\nu$ X 射线铝阴极产生的电信号 (A), i_0 为关闭中间阀时(无 X 射线)铝阴极暗电流($\sim 10^{-15}$ A), ϕ 为 X 光源强度(光子数/ 4π 秒); $\Delta\Omega$ 为铝阴极相对 X 射线光源所张的立体角, η 为能量 $h\nu$ 的 X 光通过滤片的透过率。

在图 4 中给出了铝阴极的灵敏度绝对标定结果, 图中同时也给出了国外标定的结果^[4]。从总趋势来看, 标定结果与国外结果符合得很好, 但本文的

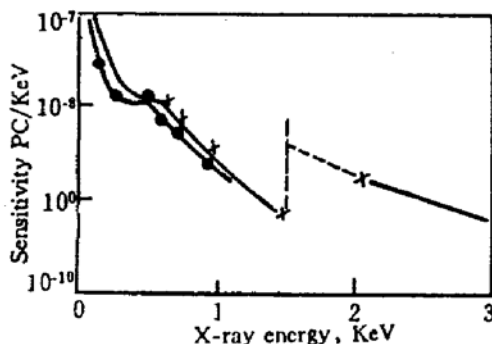


Fig. 4 The sensitivity of Al cathod

-x-: Experimental results of reference 4
 ●: Our calibrated results

铝阴极灵敏度标定值比国外结果略低($\sim 10\%$)。其中主要原因在于本文铝阴极表面加工精度差一些,由于阴极表面粗糙度的影响,更多部分电子不能逃逸出表面,导致灵敏度降低。

4 X 射线二极管(Al)探头的应用

由不同滤片——X 射线二极管(Al)探头阵列组成的亚千能谱仪的实验装置示意图如图 5 所示,在图中还给出了 X 射线二极管探头结构示意图。利用不同滤片的 K 或 L 边作为 X 射线低能截止,把 X 射线分段成不同的能区,然后再入射到 X 射线二极管上。

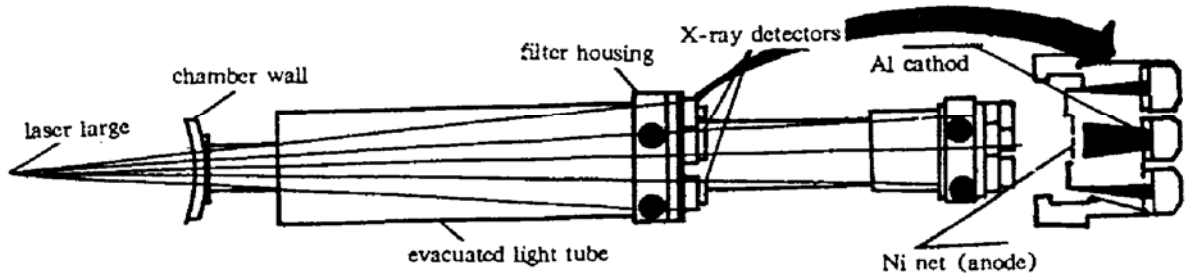


Fig. 5 The schematic of soft X ray energy spectrometer consisting of filters-X ray diode (Al) arrays

图 6 给出了同一发实验中六种不同滤片——X 射线二极管(Al)阵列对应的波形信号,采用快写速示波器记录。实验在中国科学院上海光学精密机械研究所的“神光”高功率激光器装置上完成,实验条件是:激光能量 E_L 为 600 J,脉冲宽度为 0.9 ns。

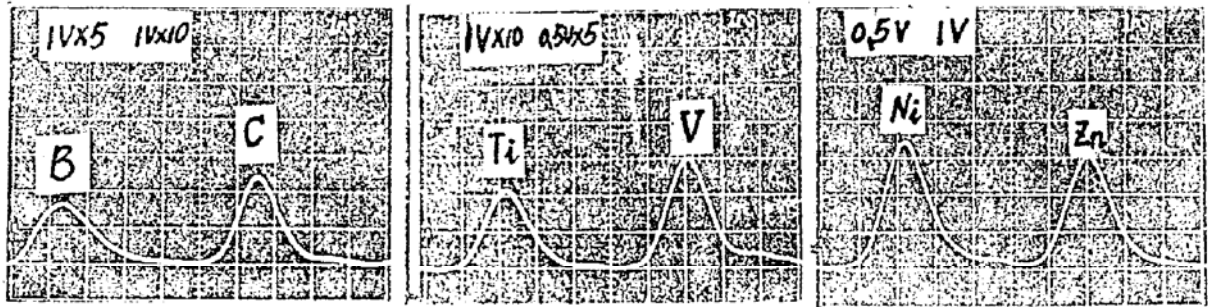


Fig. 6 The experimental result of filter-XRD(Al) arrays

根据不同能区 X 射线对应的记录信号解谱^[14]得到激光-等离子体相互作用 X 射线能谱。X 射线转换总量和辐射场温度。

本工作得到院、所领导的关心,得到 K-400 倍加速器运行组人员和单色 X 射线光源运行组人员的大力合作,得到 LF-12 装置运行人员的帮助,在此特别表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. A. Heinle, K. G. Tirsell, Filtered-mirror sub-keV X ray measurement system. *Laser Program Annual Report*, 1979, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif, UCRL-50021-79, 1980, 5-5~5-7
- [2] 孙可煦,马洪良,易荣清等,腔靶转换区辐射温度测量及定标关系. *强激光与粒子束*, 1992, 4(3): 461~466
- [3] K. G. Tirsell, D. G. Nilson, E. A. Ries, Design of nova dante spectrometer. *Laser Program Annual Report*, 1983, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., UCRL-50021-83, 1984, 5-4~5-7
- [4] R. L. Kauffman, X ray conversion efficiency. *Laser Program Annual Report*, 1984, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., UCRL-50021-84, 1985, 4-5~4-8

- [5] R. L. Kauffman, X ray conversion efficiency. *Laser Program Annual Report*, 1985, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, Calif., UCRL-50021-85, 1986, 6-5~6-7
- [6] K. Siegbahn, *Atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy*. Almqvist and wilksells, Uppsala, 1967
- [7] B. L. Henke, The characteristic of X ray photocathods in the 0.1~10 keV photoenergy region. *J. Appl. Phys.*, 1981, 52(3): 1509
- [8] I. Lindu, W. E. Spiecer, The probing depth in photoemission and auger-electron spectroscopy. *J. Electron Spectros. & Relat. Phenom.*, 1974, 3(5): 409
- [9] A. J. Braundmeier, Excitation of electron in metals by primary electrons. *Phys. Rev.*, 1956, 101(6): 1679~1684
- [10] V. E. Henrich, Role of slow secondary electrons; polycrystalline aluminum. *Phys. Rev.*, 1973, B7(8): 3512~3519
- [11] K. W. Ford, J. A. Wheeler, Semiclassical description of scattering. *Ann. Phys.*, 1959, 7(3): 259~2663
- [12] B. L. Henke, J. A. Smith, D. T. Attwood, Secondary electron energy ditribution for gold as excited by C-K_a(277 eV) and Al-K_a(1487 eV) X rays. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, 29(9): 539~541
- [13] 祁兰英, 李三伟, 沈华忠, 质子激发 X 光源及其应用. *强激光与粒子束*, 1991, 3(4): 505~511
- [14] 孙可煦, 杨建国, 郑志坚, 用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪. *强激光与粒子束*, 1990, 2(1): 16~22

Calibration of Sensitivity and Application of X-Ray Diode (Al)

Ma Hongliang Sun Kexi Xu Heping

Zeng Zijian Lu Changli Tang Daoyuan

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

(Received 30 November 1993; revised 16 February 1994)

Abstract The conversion efficiency of X-ray-induced electrons for X-ray diodes (Al cathods) was discussed. Sensitivity of Al cathod was calibrated on the monoenergy sub-keV X-ray source facility. The application of using X-ray diodes to measure sub-keV X-rays from laser-plasma interaction was introduced.

Key words X-ray diode, Al cathod, sensitivity.