

强 X 射线通过铝箔时的透射异常

卢仁祥 张正泉 潘成明 唐永红
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

由大功率激光所产生的强 X 射线(简称 LPX)线谱, 波长处于 8~11 Å, 时间脉宽 130 ps, 功率密度达 $5 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 或单色功率密度达 $4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{keV}$ (对应于波长 10 Å), 在其穿过铝箔时观察到透过的非线性异常增大。

一、引 言

本实验将报道在强 X 射线作用下材料透过率所呈现的非线性效应, 在形式上它表现为材料的光电吸收截面 σ 与光强有关, 光强增加, σ 下降, 此时对波长为 10 Å 的 X 射线而言, 其功率密度及单色功率密度分别达到 $5 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 及 $4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{keV}$ 量级; 在弱光下 ($I \ll 10^2 \text{ W/cm}^2$) 吸收截面恢复到正常的理论值。这一现象与染料被“漂白”的饱和吸收并不完全相同, 染料饱和吸收发生在两束缚能级之间, 而此处吸收上能级是自由电子的连续能级。

在软 X 射线区 ($E \ll 1.02 \text{ MeV}$), 材料吸收 X 射线的主要机制是光电效应(其它效应如康普顿散射、热散射等均较小)。强 X 射线通过薄膜时透过异常的实验现象过去之所以没有发现, 是因为室内 X 射线光源功率密度的限制。表 1 表示三种实验室的 X 射线源(伦琴射线管、同步加速辐射及 LPX^[1])的性能比较, 它给出了辐射的波长范围、源尺寸及亮度。LPX 之所以有较高的亮度, 主要是能量在时间及空间上的高度集中, 因此它能够产生通常弱光源所实现不了的新现象。进一步的计算表明, 30 kW 的伦琴射线管, 未经晶体分光, 在距光源 10 cm 处的功率密度为 $4 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$, 单色功率密度为 $50 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{keV}$, 远低于目前的实验条件下, LPX 光源经晶体分光后在距靶点源 7.5 cm 处相应的功率密度值, 如

表 1

源	$\lambda(\text{Å})$	源尺寸 (mm)	辐射发 散 度	B_λ 光子/ $\text{sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Sr}$	$B_\lambda \text{ W/cm}^2 \cdot \text{Sr}$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	最后两栏计算 所用波长(Å)
伦琴射线管 (30 千伏)	1.54	0.5×0.5	2π	$4 \times 10^{20} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	$5 \times 10^5 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	10^{-4}	1.54
БЭИП-3 (苏)新西伯利亚	0.5~5	2×0.2	2×10^{-4}	$(10^{23} \sim 10^{24}) \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	$4 \times 10^8 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	2.5
LPX (激光 10J, 100 ps, 转换效率 1%)	3~30	$\sim \phi 0.1$	2π	$\sim 10^{31} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	$1.6 \times 10^{14} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$	10^{-3}	12.4

收稿日期: 1984 年 1 月 16 日

对 10 \AA 为 $4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{keV}$, 而后者产生的 X 射线照度与万吨级 TNT 当量的原子弹爆炸在数百公尺处的辐照度相当。

二、实验条件

本实验所用的六路大功率钹玻璃激光器的总体布局可详见文献[4], 最大输出能量为 10 J, 脉宽为 100 ps 的钹玻璃大功率激光经由 $f/2.0$ 的非球面透镜, 以 $\sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 的功率密度聚焦到 NaCl 平面靶上, 打靶实验中所产生的点源 LPX 射线被 TLAPX 射线晶体谱仪所衍射^[5], 落在医用 5F 无屏 X 射线底片上, 衍射线段宽 1.5 cm, 所研究的 Al 膜放置

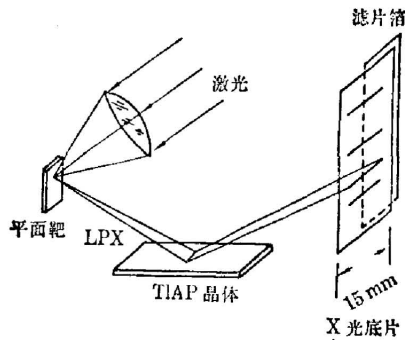


图 1 LPX 摄谱光路

Fig. 1 Optical layout for laser-produced X-ray spectrum measurements

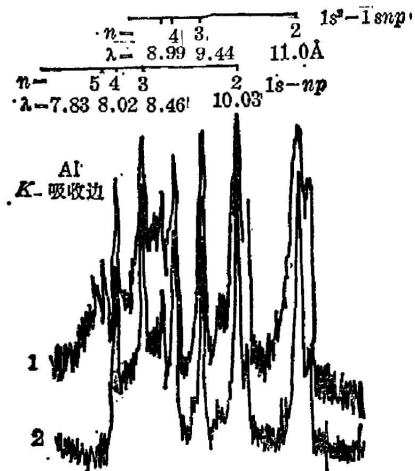


图 2 钠离子的 LPX 谱的黑度扫描曲线

1. 无 Al 箔滤片; 2. 有 Al 箔滤片

Fig. 2 Densitometer traces of the LPX spectra of sodium ions

1. without Al foil; 2. with Al foil

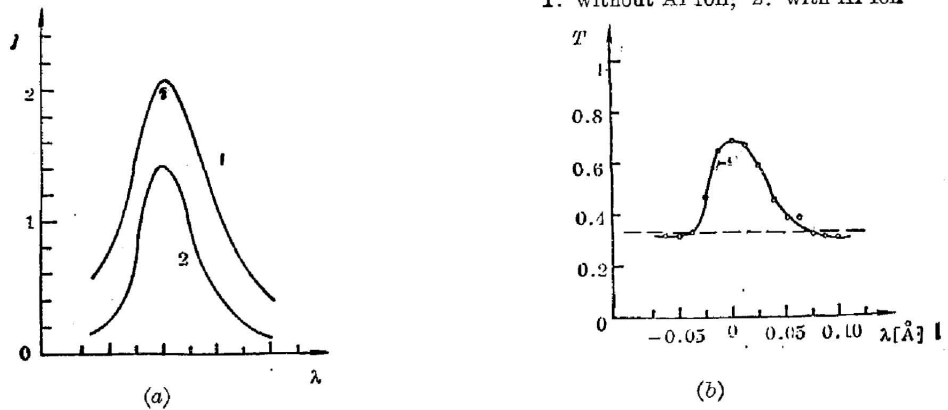


图 3 通过及不通过 Al 膜时 $\text{Na}^{10}(1s-2p)$ 谱线相对强度轮廓。

在该谱线轮廓下铝膜的透过率的非线性变化

Fig. 3 Relative intensity profiles of $\text{Na}^{10}1s-2p$ line in cases of unpassing (a) and passing (b) through the $7.34 \mu\text{m}$ Al foil, nonlinear variation of the corresponding transmissivity of Al foil

在底片前 2 mm 处, 垂直于色散方向掩盖一半暗盒位置, 如图 1 所示。由于 LPX 点源在一个小的立体角中的均匀性, 并计及晶体衍射的均匀性 ($\pm 5\%$), 暗盒窗口薄膜的均匀性与底片显影、定影中的实验误差, 导致在 X 光底片上同一道谱线不同横向位置相对强度的实验误差在 20% 以内, 因此未经 Al 膜衰减直接落在 X 射线底片上的 X 射线强度可用来表示落在 Al 膜上的 X 射线强度。X 射线强度特性曲线分别用 Fe^{55} 放射性源、软 X 光机等手段作了测量^[6]。

图 2 示出在 K201 黑度计上扫描出摄谱所得到的 LPX 光谱, 各谱线的波长及电子组态均表示在图上。图中同时给出透过或不透过 Al 膜时相应的 X 光底片透过率扫描曲线, 从中可以明显地看到波长短于 Al 膜 K 吸收边 ($\lambda = 7.95 \text{ \AA}$) 时 X 射线强度的强烈衰减。

图 3(a) 示出其中一根谱线 ($\text{Na}^{+10} 1s-2p$, $\lambda = 10.03 \text{ \AA}$) 通过 $7.34 \mu\text{m}$ 铝膜及不通过铝膜时所还原出的强度曲线, 其中谱线峰值波长位置互相叠合, 图 3(b) 则是在该谱线轮廓下对应于不同 X 射线强度的铝膜透过率*。

三、数据处理结果

薄膜的理论透过率公式为 $T = I/I_0 = \exp(-\mu_c l)$ 计算四种不同波长的 X 射线通过 $7.34 \mu\text{m}$ 厚度铝膜的理论透过率如表 2 所示。

表 2 四种不同波长的理论透过率
Table 2 Theoretical transmissivity of $7.34 \mu\text{m}$ Al foil for four different X-ray wavelengths

波 长 (\AA)	11.0	10.03	9.44	8.46
T	0.247	0.316	0.357	0.449

波长 10 \AA 的 X 射线透过 $7.34 \mu\text{m}$ 铝膜的理论曲线如图 3(b) 中虚线所示, 而图中“o”表示实验得到的透过率。由图 3(b) 可知, 在 X 射线强度较低的谱线轮廓底部 ($I_0 \ll 10^3 \text{ W/cm}^2$), 实测值与理论值相符; 而在 X 射线强度较高的峰值处 ($I_0 \sim 5 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$), 透过率的实测值比理论值增大很多。

用同样的方法以实验上测出的入射光强为横坐标, 透射光强为纵坐标可作出四种不同波长 X 射线的透过行为, 如图 4 所示。图中的光强单位为单位面积上光子数, 因为在实验中发现的透过异常现象实际上仅与 X 射线功率有关, 故这里的光强单位应该用 $[\text{W/cm}^2]$ 来表示。注意到 LPX 的时间脉宽比激光脉宽稍宽^[7], 在我们的情况下是激光脉宽的 1.3 倍, 约 130 ps, 因此不难将图 4 上的坐标单位化为对应的 $[\text{W/cm}^2]$ 。如将一根谱线近似为以波长半高全宽度为底边, 峰值强度为高的矩形, 即可求出近似的单色功率密度。

图 4 中的虚线表示波长为 11 \AA 的 X 射线对 $7.34 \mu\text{m}$ 铝膜的理论透过曲线 $I = 0.247 I_0$, 其斜率即透过率不随光强变化。实际上当光强低于 $2 \times 10^8 \text{ photon/cm}^2$ 光子数时, 11 \AA X 射线透过强度的实验曲线与理论预期值符合。同样其它各波长的 X 射线在低

* 铝膜的厚度分别用称重法、放射性荧光法及接触干涉法进行了测量。

强度下也都各自趋向于以表 2 所给值为斜率的理论透过曲线。

随着入射光强的增加,图 4 中的实验曲线偏离理论预期值越来越大,实验中入射光子强度达到 $4.8 \times 10^8 \text{ photon/cm}^2$, 对于实验中入射波长为 10 \AA 的 X 射线,这相应于功率密度为 $7.3 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, 或单色功率密度 $6.1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{keV}$, 不难看出,此时穿过 $7.34 \mu\text{m}$ 的铝膜的光强将比理论预期值高出一倍以上,这将是一个不容忽视的修正。

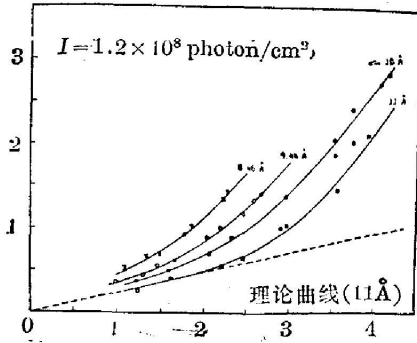


图 4 四种不同波长不同强度的 X 射线对 $7.34 \mu\text{m}$ 铝膜的透过行为

Fig. 4 Dependence of the transmission intensity I of $7.34 \mu\text{m}$ Al foil upon the incident intensity I_0 for four different X-ray wavelengths

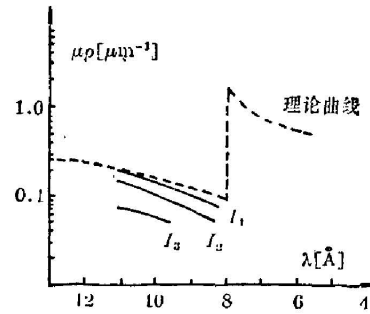


图 5 铝膜线性吸收系数随 X 光波长变化

$I_1=3.6 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$; $I_2=1.5I_1$; $I_3=2.0I_1$

Fig. 5 Variation of the linear absorption coefficient $\mu\rho$ of Al foil against the X-ray wavelength for different radiation intensities ($I_1=3.6 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, $I_2=1.5I_1$ and $I_3=2.0I_1$, and the theoretical curve for $I_0 < 10^3 \text{ W/cm}^2$)

如果将强 X 射线下穿过吸收薄膜时的指数衰减公式形式性地修改为 $I = I_0 \exp[-\mu(I_0)\rho l]$, 以表示吸收与光强有关,则不难利用图 4 的实验数据求出线吸收系数 $\mu(I_0\lambda)\rho$ 。图 5 就是以 I_0 为参量, $\mu(I_0\lambda)\rho$ 为纵坐标, λ 为横坐标的实验曲线。从图 5 可见,在弱光情况下 ($I < 10^3 \text{ W/cm}^2$) 铝膜的吸收曲线表示为熟悉的“之”字形,它在 K 吸收边 ($\lambda = 7.95 \text{ \AA}$) 有一个突然的跳跃, K 吸收边红侧几根附加的曲线表示光强增加时吸收系数减小的情况,可见对波长为 10 \AA 、 11 \AA 的 X 射线,光强在 $7 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 以上时,质量吸收系数(或吸收截面)形式上下降一半多。此处对铝的透过异常是用铝吸收 K 边红侧的波长做的,而在 K 边紫侧因为铝膜的吸收过大,实验数据下降到底片噪声水平,无法作定量处理。但是用 $4.23 \mu\text{m}$ 厚 Mylar 膜 ($\text{C}_{10}\text{H}_4\text{O}_5$) 作为吸收薄膜的实验表明,在吸收材料 K 边紫侧异常透过现象亦是存在的, Mylar 膜中 H、C、O 的 K 吸收限波长分别为 911.8 \AA 、 43.5 \AA 及 23.5 \AA , 均大于 Na 的 LPX 线谱波长。

进一步用 $2 \mu\text{m}$ 一层铝膜(或 $4.23 \mu\text{m}$ 一层 Mylar 膜)的多层阶梯减光板来做试验,在实验数据的误差范围内显示出光强衰减的自洽性及叠加性。如记单独穿过第 i 层薄膜的透过率为 T_i , 则有 $T_1 > T_2 > \dots \geq T_n$ 的实验结果(其中 T_n 是理论透过率),这恰好表明了薄膜吸收的非线性行为。

应当指出, 当用一个更普适的函数 $I = f(I_0, \lambda, l)$ 来表示(初始光强为 I_0 , 波长为 λ 的 X 射线穿过厚为 l 的薄膜后的)透射光强。则当穿过第一层薄膜时透射光强 $I_1 = f(I_0, \lambda, l_1)$, 再穿过第二层薄膜时透射光强 $I_2 = f(I_1, \lambda, l_2)$, 而如果两层一起穿过时透射光强为 $I_2 = f(I_0, \lambda, l_1 + l_2)$, 那末效应可叠加性的数学表示为 $f[f(I_0, \lambda, l_1), \lambda, l_2] = f(I_0, \lambda,$

$I_1 + I_2$)。修改后的指数函数形式 $\exp[-\mu(I_0)\rho l]$, 显然不符合叠加性原则, 因此它只是一种方便的数学近似而已。

四、初步分析与讨论

(1) 整个实验的数据分析是以 X 射线区曝光的倒易律成立作为前提的, 即同样的黑密度只与曝光量 $E = I \cdot t$ 有关, 与曝光时间 t 无关, 因而用 X 射线机或放射性源靠时间积累所获得 X 射线底片的黑度定标曲线也能用来表示瞬时 X 射线的光子数密度与黑度的定量关系, 曝光倒易律在 X 射线区内成立是有大量理论及实验基础的^[8~10]。国内外有关激光等离子体的实验中, 在进行等离子体诊断的定量分析时所用的 X 射线底片特性曲线, 都是在远比 LPX 光源时间脉宽长得多的条件下, 用弱 X 光源长时间积累获得的。

(2) X 射线被薄膜吸收的主要物理机制是光电效应。由光电效应产生的光电子, 由于非弹性散射, 光电子的逃逸深度小于 100 \AA , 绝大多数光电子逃不出样品表面^[11], 因此被 X 射线逐出的光电子不会在底片上引起附加的潜影, 另外在本实验设计所用的薄膜材料及波长范围内, 由 LPX 激发的荧光 X 射线产额极低, 也不足以引起曝光。排除光电子及 X 射线荧光引起底片附加的曝光最有说服力的判断实验是使吸收滤片远离底片, 我们把吸收滤片(铝或 Mylar 膜)置于 X 射线源和衍射晶体之间, 这时非线性异常透射的定性结论依然成立。

引起透射异常典型的光子密度 $4 \times 10^8 \text{ photon/cm}^2$, 相当于 $1 \mu\text{m}^2$ 落到 4 个光子, 面心立方结构的铝其最邻近间距为 2.86 \AA , 在 1.9×10^6 个铝原子中仅有一个经受光离化, 为什么仍然有这样明显的透过效应呢? 这就为理论工作提出了新的研究课题。显然此处所述的现象既不同于完整晶体中 X 射线异常透过的 Borrmann 效应, 也不同于快粒子通过晶体时的沟道效应。

(3) 在激光等离子体实验中, 连续谱的测量不管是对比法测温, 阶梯滤片法, K 边多道或 Ross 滤片法, 均是以金属薄膜的弱光透过率值作为理论基础的。一旦这一基础发生动摇, 将引起实验数据的相应修正。以 K 边多道法为例, 在同样大功率激光打靶实验条件下获得的连续谱数据(见文献[12]中的图 7), 其中 X 光连续谱纵坐标光强在 2×10^{10} 以上的数据点(包括低温电子温度)有可能需要修正。根据本实验所提供的定性结论, 低温连续谱曲线将左移, 用高、低温电子温度交叉的拐点也必须左移。

托卡马克等离子体实验装置中 K 边多道诊断的实验数据不必更正, 因为那里 X 射线光子功率密度远低于激光等离子体实验值。

同样, 薄膜滤片吸收的非线性也将易于解释早期 X 射线底片瞬时定标实验曲线中反差因子 γ 偏小的奇怪现象, 如在文献[13]图 5 中明显可见波长为 $11 \sim 12 \text{ \AA}$ 特性曲线的 γ 明显变小。

(4) 薄膜滤片在经受强 X 射线照射时, 透过率增加的非线性现象可为将来 X 激光提供可饱和吸收调 Q 开关的技术储备。如果透过异常的物理本质确是光电吸收截面的下降所引起, 则这一现象可望减少实现 X 激光的泵浦功率要求, 此外如果本实验所揭示的现象有普遍性, 那么在原子弹爆炸时大气对 X、 γ 射线的透过特性将比原来预期的要高, 原来用来

防护 X、 γ 辐射的掩蔽材料也要适当加厚, 太阳中黑子爆发时, X、 γ 射线对地球大气的穿透等影响也将重新考虑。

(5) 本实验中提出了一类新的研究对象——有大量内壳层电子空穴物质的瞬态行为, 这种物质即不同于等离子体也不同于普通的固体。原子弹爆炸的 X、 γ 辐射及 LPX 可以造成这种状态, 束箔光谱中被离子束快速轰击瞬间的薄膜也处于这种状态, 对这类物质行为的研究有待进一步开展。

本实验是在我所六路大功率激光实验装置上完成的, 得到六路实验组同志的大力帮助; 实验中也得到徐至展同志的支持和帮助; 殷光裕、范品忠、毛楚生同志提供了黑度特性曲线; 毛楚生同志还协助作了实验条件准备; 康玉英同志协助进行 X 射线底片的黑度扫描工作, 上海原子核所乐安全同志测量了铝膜的厚度; 作者也曾与陶祖聪、顾援、申怀椿同志进行了有益的讨论, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] W. J. Veigele; *Atomic Data Tables*, 1973, **5**, No. 1, 51.
- [2] P. Lublin *et al.*; *Advances in X-ray Analysis*, 1969, (London, England, Plenum 1970), 632.
- [3] Г. П. Кулипанов *и др.*; *УФН*, 1977, **122**, No. 3, 369.
- [4] 邓锡铭等; *光学学报*, 1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [5] 卢仁祥等; *光学学报*, 1982, **2**, No. 6 (Nov), 568.
- [6] 范品忠等; *光学学报*, 1984, **4**, No. 10 (Oct), 956.
- [7] M. H. Key; *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, 1980, **298A**, No. 1439, 351.
- [8] 詹姆斯·希金斯著; *摄影感光理论基础*, (中国电影出版社, 1957, 北京), 72.
C. E. K. Mess, J. H. James; *The Theory of Photographic Process. 3rd ed.*, (Macmillan N. Y., 1966).
- [9] A. A. Kologrinov *et al.*; *Sov. J. Quant. Electron.*, 1975, **QE-5**, No. 10 (Oct), 1210.
- [10] S. Uchida, H. Fujita; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**, No. 8 (Aug), 1641.
- [11] 张永福, 江绍猷; *物理*, 1979, **8**, No. 2 (Feb), 109.
- [12] 欧阳斌等; *中国激光*, 1984, **11**, No. 1 (Jan), 20.
欧阳斌等; *核电子学与探测技术*, 1982, **2**, No. 1, 37.
- [13] 毛楚生等; *核聚变与等离子体物理*, 1983, **3**, No. 2, 102.

Transmission anomalies of aluminium foils irradiated by intense laser-produced X-ray radiation

LU KENXIANG CHANG CHENGCHUAN PAN CHENGMING AND TANG YONGHONG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 16 January 1984)

Abstract

Anomalous nonlinear increasing in transmissivity of aluminium foils in the wavelength range 8~11 Å has been observed. These foils were irradiated with the monochromatic X-ray radiation at about 5×10^2 W/cm² generated by a high-power neodymium-glass laser.