

用于电子能谱测量的 LiF 热释光探测器标定*

蔡达峰^{1,2}, 谷渝秋², 郑志坚², 崔高显², 温天舒², 杨向东¹

(1. 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 用 标准源对 LiF 热释光探测器 (TLD) 的灵敏度因子、线性吸收系数、离散性、重复性进行了测定。在此基础上建立了电子质量阻止本领的修正模型, 理论上计算出电子等效质量阻止本领, 给出单能电子的注量。由 LiF TLD 阵列可测量激光-等离子体相互作用中发射的超热电子能谱(能量-注量关系)。

关键词: LiF 热释光探测器; 质量阻止本领; 电子注量

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A

在激光-等离子体相互作用中, 超热电子能谱的测量是研究激光-等离子体相互作用机制的重要手段之一。超热电子能谱的测量有多种方法, 主要有复合靶的 K 线法^[1], 高能离子测量法^[2], 硬 X 射线法^[3]等。然而, 最直接的方法是利用电子磁谱仪进行测量。

国外采用电子磁谱仪对激光-等离子体相互作用产生的超热电子能谱进行测量时, 大多数利用硅面垒或硅二极管作为探测器^[4~7]。超灵敏 LiF TLD (thermoluminescence dosimeter) 最近的发展使采用薄型 LiF TLD 探测电子成为可能^[8]。有关文献^[9, 10]已采用 LiF TLD 测量电子能谱, 然而目前只给出了电子相对强度与能量的关系。

为了采用 LiF TLD 阵列测量电子能量-注量的关系, LiF TLD 的标定就成为非常重要的一个环节。

1 LiF TLD 参数的测定

根据实验的实际情况, 选用尺寸为 3.2mm × 3.2mm × 0.38mm 的⁷LiF (Mg, Cu, P) TLD 作为电子磁谱仪的探测元件。由于⁷LiF TLD 对低能中子的响应远低于⁶LiF TLD 和天然 LiF TLD, 这有利于剔除中子的干扰, 而且对快中子响应很小。因此, 实验中不必对中子进行慢化。

为了确定电子的注量, 需要对 LiF TLD 的相关参数进行测定。随机选出 50 片 LiF TLD 进行编号后, 在 240 °C 恒温下退火 10min, 在¹³⁷Cs 标准源齐向场辐照 10min, 标准吸收剂量 D_{LiF} 为 3.61×10^{-3} Gy。最后, 在 TLD 读数仪上设定 M₂ 程序升温, 测定其离散性、重复性、线吸收系数和灵敏度因子, 其结果如图 1。

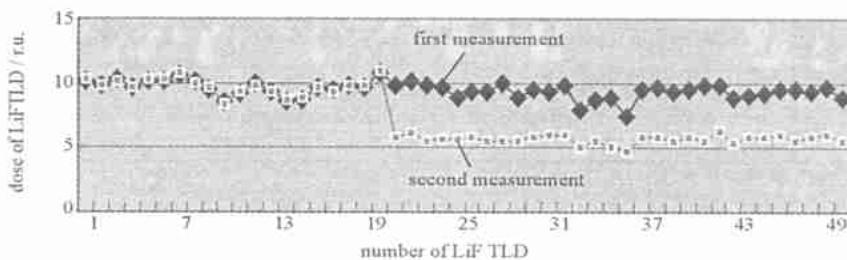


Fig. 1 Parameter measurement of LiF TLD

图 1 LiF TLD 的参数测量

图 1 中黑点为第一次测量, 经计算对平均值最大偏离为 12%。由于采用逐片刻度, 因此离散性对测量的影响可不予考虑。白点为第二次测量, 其中 1~20 号旨在测其重复性。由曲线可见, LiF TLD 重复性相当好, 经计算重复的最大偏差为 2.1%; 而后 21~50 号判读时在上面盖以白片(退火后的 LiF TLD), 旨在测定 LiF TLD 自身对所发出的热释光的自吸收系数。根据公式 $I = I_0 e^{-\mu d}$, 求得平均线性吸收系数为 $\mu = 1.31 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, 同时得到每片 LiF TLD 的灵敏度因子, 记为 X (表示每单位标称读值为 $X \text{ mGy}$)。

* 收稿日期: 2002-02-27; 修订日期: 2002-11-28

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题(2000Z0206); 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 蔡达峰(1963-), 男, 博士生, 副教授, 从事超短超强激光与物质相互作用研究; 四川绵阳 919-986 信箱。

郑志坚(1941-), 男, 研究员, 博导, 第一作者导师; 杨向东(1943-), 男, 教授, 博导, 第一作者导师。

2 电子质量阻止本领修正

在测量激光-等离子体相互作用产生的超热电子能谱时,把 LiF TLD 作为电子磁谱仪的探测元件, LiF TLD 排成一行的阵列。电子经磁谱仪的磁场偏转后,不同能量的电子落在位置不同的 LiF TLD 上。由于所选 LiF TLD 尺寸较小,在满足能量分辨率的要求下,可以认为落在同一 LiF TLD 上的电子是单能电子。

假设某一位置处(对应的电子能量为 E_{ci})的 LiF TLD 的读值为 Y_i (标称读值), LiF TLD 的吸收剂量为 $D_i = XY_i$,则该处的 $D_i \sim E_{ci}$ 关系可以建立。通过 LiF TLD 阵列便给出了剂量与能量($D \sim E_c$)关系。然而,本文的目的是要由 LiF TLD 阵列给出电子注量与电子能量 E_c 的关系。

在同一位置处(电子能量为 E_{ci}),如果 LiF TLD 为“无限薄”,则有

$$i = \frac{D_i}{(s/\rho)_i} = \frac{XY_i}{(s/\rho)_i} \quad (1)$$

式中: i 为该处电子注量,单位 cm^{-2} ; D_i 为该处 LiF TLD 的吸收剂量,单位 Gy; $(s/\rho)_i$ 是能量为 E_{ci} 的电子的质量碰撞阻止本领,单位 $\text{MeV cm}^2 \text{g}^{-1}$; s 为电子线性碰撞阻止本领,单位为 MeV cm^{-1} ; ρ 为 LiF 的密度,单位为 g cm^{-3} 。由于韧致辐射产生的电子的能量损失远小于由于碰撞产生的能量损失,故可忽略质量辐射阻止本领。

根据相关文献[11]可直接查到 LiF 对不同能量电子的质量阻止本领。作出 (s/ρ) 随 E_c 的变化曲线,如图 2。可见,对低能电子,质量阻止本领很大;随能量的增加,质量阻止本领下降,约 0.5 MeV 以后,质量阻止本领几乎不改变。

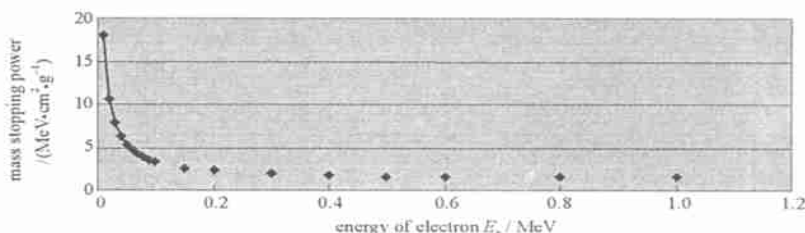


Fig. 2 Plot of mass stopping power (not corrected)

图 2 质量阻止本领曲线(未修正)

根据(1)式结合文献[11]的数据可得到该处 $i \sim E_{ci}$ 的关系,进一步由 LiF TLD 阵列可给出电子注量与能量($i \sim E_c$)的关系。

然而,对有一定厚度的 LiF TLD 不能直接采用这个质量阻止本领数据。原因在于,用刻度 LiF TLD 时, LiF TLD 的吸收是处处均匀的;而电子射程有限,尤其对低能电子,它不能穿透 0.38mm 厚度,导致 LiF TLD 不均匀发光;而且较深层电子沉积能量后, LiF TLD 发光还会被上面层吸收。考虑这两个因素,为了准确地给电子注量,必须对电子质量阻止本领加以修正,引入等效质量阻止本领 $(s/\rho)_{\text{eff}}$ 。

3 电子等效质量阻止本领

将 0.38mm 厚的 LiF TLD 分为 13 层,各层厚度为 d_n ($n=1, 2, \dots, 13$; 其中 $d_1=0.02\text{mm}$, $d_2=d_3=\dots=d_{13}=0.03\text{mm}$)。由于电子进入 LiF TLD 后,能量逐渐损失,而能量不同,质量阻止本领也就不同。设初始动能为 E_1 的电子,第一层质量阻止本领为 $(s/\rho)_1$,穿过第一层后能量变为 E_2 ;第二层质量阻止本领为 $(s/\rho)_2$,穿过第二层能量为 E_3 ;...;依次类推,则穿过第 n 层后能量为

$$E_{n+1} = E_n - (s/\rho)_n d_n \quad (2)$$

计算出 E_{n+1} 后,用 E_{n+1} 查出对应的质量阻止本领 $(s/\rho)_{n+1}$,再计算 E_{n+2} 。当能量为 E_{n+1} 的电子经计算不能穿过第 $n+2$ 层,则按质量阻止本领定义计算其质量阻止本领;当能量为 E_{n+1} 的电子穿出 LiF TLD,则只考虑在 LiF TLD 中沉积的能量,剩余动能不计。用(2)式分层计算出的电子穿透深度与文献[11]中电子连续慢化射程很好吻合。

假设第一层不吸收光,而第二层发出的光经第一层吸收,第三层发出的光经第一、二层吸收, ..., 依此类推。这样能量为 E_c 的电子等效阻止本领为

$$(s/\)_{\text{eff}} = (s/\)_1 \frac{d_1}{L} + (s/\)_2 \frac{d_2}{L} e^{-\mu d_1} + (s/\)_3 \frac{d_3}{L} e^{-\mu(d_1+d_2)} + \dots \quad (3)$$

式中: L 为 LiF TLD 的总厚度, $(s/\)_n (d_n)/L$ 正比于 LiF TLD 第 n 层所吸收的能量; 而因子 $e^{-\mu(d_1+d_2+\dots+d_{n-1})}$ 体现了第 n 层发出的热释光被以上各层的吸收。

根据(2)、(3)式, 可得到能量从 0.01MeV 到 1MeV 的电子在 0.38mm 厚的 LiF TLD 中的等效质量阻止本领。作出 $(s/\)_{\text{eff}} \sim E_e$ 关系曲线, 如图 3。可见: 电子能量较低时, 等效质量阻止本领较小; 随能量增大, 等效质量阻止本领逐渐增大; 大约 0.3MeV 时, 等效质量阻止本领达到最大; 随后, 随能量进一步增加, 等效质量阻止本领减小; 约 0.5MeV 以后, 等效质量阻止本领趋于恒定。

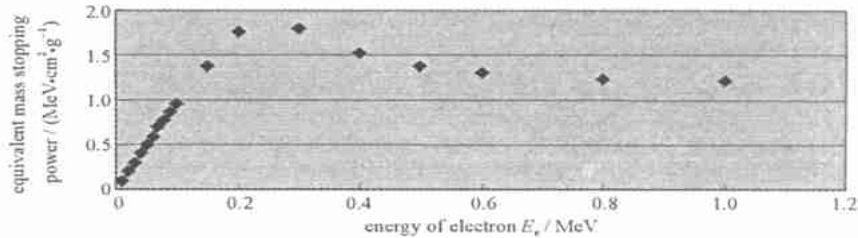


Fig. 3 Plot of equivalent mass stopping power

图 3 等效质量阻止本领曲线

这条曲线给出一幅清晰的物理图像: 当电子能量较低时, 射程短, 能量几乎全部沉积于表层。对 LiF TLD 而言, 吸收剂量小, 等效质量阻止本领小。当能量增加, 电子仍未穿过 LiF TLD, 电子将达到更大的深度, 把能量全部沉积于这个深度上的各层, 相应地, LiF TLD 吸收剂量增大, 等效质量阻止本领增大。当电子能量达到 0.3MeV 时, 电子恰好能穿出 LiF TLD, 电子的全部能量均沉积于 LiF TLD 的各层, 相应地, LiF TLD 吸收剂量达到最大, 等效质量阻止本领也达到最大。最后, 随电子能量进一步增加(达 0.5MeV), 电子穿出 LiF TLD, 剩余能量不沉积于 LiF TLD 中, 对 LiF TLD 吸收剂量无贡献, 故等效质量阻止本领逐渐恒定。

4 结 论

本文对 LiF TLD 的灵敏度因子、线性吸收系数、离散性、重复性进行了测定。在此基础上, 考虑不同能量的电子在 LiF TLD 中射程不同以及热释光的自吸收, 引入等效质量阻止本领; 从理论上计算出不同能量电子的等效质量阻止本领, 给出了等效质量阻止本领与电子能量的关系曲线。根据(1)式并代入等效阻止本领 $(s/\)_{\text{eff}}$, 能确定某处单能电子的注量。将 LiF TLD 阵列作为电子磁谱仪探测元件可给出超热电子能量-注量关系。

参考文献:

- [1] Fewes A P, Norreys P A, Beg F N, et al. Plasma ion emission from high intensity picosecond laser pulse interactions[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, **73** (13):1801.
- [2] Schnurer M, Kalashnikov M P, Nickles P V, et al. Hard X-ray emission from intense short pulse laser plasmas[J]. *Phys Plasmas*, 1995, **2**(8): 3106.
- [3] Key M H, Cable M D, Cowan T E, et al. Hot electron production and heating by hot electrons in fast ignitor research[J]. *Phys Plasmas*, 1998, **5**(5):1966.
- [4] Malka G, Miquel J L. Experimental confirmation of ponderomotive-force electrons produced by an ultrarelativistic laser pulse on a solid target[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(1): 275.
- [5] Malka G, Fuchs J, Amiranoff F, et al. Suprathermal electron generation and channel formation by an ultrarelativistic laser pulse in an underdense preformed plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **79**(11):2053.
- [6] Malka G, Lefebvre E, Miquel J L. Experimental observation of electrons accelerated in vacuum to relativistic energies by a high-intensity laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(17):3314.
- [7] Schlegel Th, Bastiani S, Gremillet L, et al. Comparison of measured and calculated X-ray and hot-electron production in short-pulse laser-solid interactions at moderate intensities[J]. *Phys Rev E*, 1999, **60**(2):2209.
- [8] Bilski P, Budzanowski M, Olko P, et al. Properties of different thin-layer LiF: Mg, Cu, P TL detectors for beta dosimetry[J]. *Radiat Prot Dosim*, 1996, **66**(1-4):101.
- [9] Chen L M, Zhang J, Teng H, et al. Experimental study of a subpicosecond pulse laser interacting with metallic dielectric targets[J]. *Phys Rev E*,

2001, **63**:036403-1.

- [10] Chen L M, Zhang J, Dong Q L, et al. Hot electron generation via vacuum heating process in femtosecond laser-solid interactions[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**(6):2925.
- [11] 张兴宝. 1~50MeV 电子束辐射剂量学[M]. 北京:原子能出版社,1994. (Zhang X B. 1~50MeV electron beam radiation dosimetry. Beijing: Atomic Energy Press, 1994)

Calibration of LiF thermoluminescence dosimeters used to measure the electron energy spectrum

CAI Da-feng^{1,2}; Gu Yu-qiu²; ZHEN G Zhi-jian²; CUI Gao-xian²; WEN Tian-shu²; YANG Xiang-dong¹

(1. *Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)*

Abstract: The sensitivity, linear absorption coefficient and derivation, repeatability for LiF thermoluminescence dosimeter (TLD) are measured using a standard γ -ray source. A model is built to correct mass stopping power of the electron. The equivalent mass stopping power of the electron is calculated theoretically using the corrected model. The electron fluence can be obtained from the effective stopping power. An array of LiF TLD can be used to measure the hot electrons energy spectrum emitting from laser-plasma.

Key words: LiF TLD; Mass stopping power; Electron fluence