

成像板发光原理及其特性*

王浩然¹⁾²⁾³⁾ 田宝贤³⁾ 薄楠¹⁾²⁾³⁾ 刘伏龙³⁾ 贺创业³⁾
贾少青⁴⁾ 郭冰³⁾ 王乃彦^{3)†}

1) (北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)

2) (北京师范大学, 射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875)

3) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

4) (原子高科股份有限公司, 北京 102413)

(2023 年 4 月 12 日收到; 2023 年 6 月 12 日收到修改稿)

由于成像板 (imaging plate, IP) 对电磁辐射场不敏感, 因而作为探测介质被广泛应用于激光驱动的辐射粒子诊断设备中, 在使用前需要对其特性和物理机制进行研究. 利用⁹⁰Sr/⁹⁰Y 电子源测量 BAS-SR 和 BAS-TR 两种 IP 板的时间衰减曲线, 同时对长时间辐照的衰减曲线进行修正; 刻度了 BAS-SR 和 BAS-TR 两种 IP 板对⁹⁰Sr/⁹⁰Y 电子源的绝对灵敏度, 其分别为 (0.033 ± 0.002) PSL/ e 和 (0.0180 ± 0.0038) PSL/ e (photostimulated light, PSL), 与国际上大部分电子绝对刻度的结果基本相符, IP 板对辐射粒子的绝对刻度依赖于 IP 板的类型、扫描设备和实验环境. 此外对 BAS-SR 和 BAS-TR 两种 IP 板辐照后进行多次连续扫描, 研究了信号强度变化趋势的规律. 建立了用于描述辐射粒子在 IP 板荧光层中沉积能量、存储信息和信息读取微观物理过程的光激励发光模型, 结合光激励发光模型建立的数学模型有效地阐释了 IP 板探测辐射粒子物理机制与其表现的特性之间的关系. 这些研究可以为后续开展 IP 板应用于激光等离子体诊断实验提供一定的数据基础.

关键词: 成像板, 特性研究, 光激励发光

PACS: 52.38.-r, 07.81.+a, 07.77.Ka

DOI: 10.7498/aps.72.20230587

1 引言

随着激光技术的发展, 目前激光最大功率已经突破皮瓦^[1], 激光脉冲宽度可以达到飞秒水平, 超短超强激光与物质相互作用产生强电磁场加速的超热电子, 其脉冲宽度与激光脉宽水平相当^[2], 对于激光驱动超热电子的诊断一直以来是激光等离子体中的研究热点. 成像板 (imaging plate, IP) 是一种基于磷光剂成像技术、可重复利用的辐射粒子累计剂量探测介质^[3], 由于其不受电场和磁场的影响^[4], 对辐射粒子的线性动态范围超过 5 个数量

级^[5]; 易于操作和被动操作, 可以被切割成不同尺寸、形状^[6]; IP 板经扫描后获得图像为数字形式便于存储和数据处理^[7], 因此 IP 板作为探测介质广泛应用于激光驱动的辐射粒子探测诊断设备中.

IP 板对不同类型、能量的辐射粒子响应不同, 并且非常依赖读取设备和使用环境. Bonnet 等^[8,9]刻度了 BAS-SR, BAS-MS 和 BAS-TR 三种类型的 IP 板对 0—10 MeV 内的电子、光子以及 0—100 MeV ⁴He 粒子的响应, 由于重离子最容易损失能量, 电子次之, 而光子的穿透能力最强, 因此 IP 板对相同能量而不同类型粒子的响应不同: ⁴He 粒子 > 电子 > 光子. Williams 等^[10]详细研究了一台

* 国家自然科学基金 (批准号: 11935008) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangny@bnu.edu.cn

相同扫描仪设置不同的光电倍增管电压值, 以及相同实验条件下 3 台扫描仪之间读取的信号差异. Ohuchi 等^[11]系统地探究了 IP 板的信号衰减与时间和温度之间的关系. 大量的刻度实验表明, IP 板的响应参数非常依赖实验条件本身^[6,12–15], 因此在使用前必须对 IP 板的特性参数进行刻度.

IP 板的特性由其存储原理决定, IP 板的荧光层由典型的电子俘获材料 MF X ($M = \text{Ca, Sr, Ba}$; $X = \text{Cl, Br, I}$) 碱土金属氟卤化物 BaFBr 构成, 当辐射粒子辐照时, 在荧光层中沉积能量激发产生大量的自由电子-空穴对, 自由电子被电子陷阱捕获. 在黑暗环境中一定程度可以保持这种状态, 读取信息时, 扫描仪发射可见光, 电子从陷阱中逃脱与发光中心复合释放存储的信息. 1984 年, Takahashi 等^[16]建立导带转移模型描述了电子在信息存储和读取过程中的输运过程, 但是导带转移模型的光激励发光强度与辐照剂量的关系和实验中发现的线性关系不符. Von Seggern 等^[17,18]提出了电子隧穿转移模型, 其中电子隧穿模型中的激励发光复合中心的形成原因有待发掘, 且隧穿态高于激发态的能级与能量弛豫方向相反. 赵辉^[19]则认为电子转移既通过导带过程同时也通过隧穿过程, 提出了光激励发光并行模型, 通过实验结果证实了并行模型的正确性, 且光激励发光的强度与入射的辐射粒子的沉积能量成正比, 但是该模型无法解释 IP 板的时间衰减特性. 基于荧光层的成分组成提出的各种电子转移模型解释了 IP 板表现出的部分特性.

本文利用已知活度的 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源对 BAS-SR 和 BAS-TR 两种型号 IP 板的时间衰减特性、能量响应特性以及多次扫描的规律进行研究, 利用光激励发光模型阐释这些特性规律, 根据递次衰变规律对长时间辐照的时间衰减曲线进行修正.

2 实 验

IP 板特性研究的实验布局见图 1, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源的放射性物质与外壳前表面距离约为 2 mm, 2π 立体角的活度为 39256 Bq ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$), 实验中使用了 BAS-SR 和 BAS-TR 两种型号的 IP 板. 为了避免使用 Al 膜等挡光介质包裹 IP 板对电子源的能谱和强度的影响, 整个实验在暗室中进行. IP 板紧贴 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源放置, 以确保 2π 立体角内发射的电子几乎全部被 IP 板所接收. IP 板后 1 m 内无其他物质, 避免了背散射电子的影响. IP 板在辐

照后冷却不同时间后, 使用 Fly-7000 扫描仪进行扫描读取信息, 获取数字化图像.

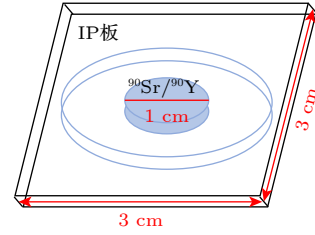


图 1 利用 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 放射源标定 IP 板特性参数实验
Fig. 1. Calibration experiments for IPs based on a $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ radioactive source.

2.1 IP 板的时间衰减曲线刻度

IP 板被辐照后冷却不同的时间后, 由于自发的电子-空穴对的复合导致 IP 扫描的信号强度随着冷却时间延长而衰减被称为时间衰减. 实验中 IP 板在辐照结束后到扫描过程中其冷却时间不等, 因此非常有必要研究 IP 板在不同冷却时间的信号衰减程度以计算真正测量的数据.

设 $f(t)$ 为 IP 板信号的衰减效应时间曲线函数 (归一化), 表征 IP 板辐照后冷却 t 时间后剩余信号的百分比. 设 Y 为信号的产生率, 短时间可认为是常数, 由于衰减效应, 信号产生的同时伴随着衰减, 为了减小衰减曲线对测量信号的计算误差, 有必要对测量得到的衰减曲线进行修正.

1) 当辐照时间 Δt 非常短时, IP 板读取时获得信号表示为

$$\chi(t) = Y\Delta t f(t). \quad (1)$$

通过直接拟合读数信号数据就可以获得 IP 板的衰退效应时间函数 $f(t)$.

2) 当辐照时间不可忽略时, 设辐照时间为 τ , 辐照后冷却时间为 t_1 , 此时 IP 板读取的信号变为

$$\chi(\tau, t_1) = \int_{-\tau}^0 Y f(t_1 - t) dt = Y \int_{-\tau}^0 f(t_1 - t) dt. \quad (2)$$

大量实验结果表明, IP 板的衰减效应函数近似满足双指数函数形式^[4,9,20,21], 即

$$f(t) = A_1 e^{(-t/B_1)} + A_2 e^{(-t/B_2)}, \quad (3)$$

其中 $A_1 + A_2 = 1$, 将 (3) 式代入 (2) 式中, 得到:

$$\chi(\tau, t_1) = Y[A_3 e^{(-t_1/B_1)} + B_3 e^{(-t_1/B_2)}], \quad (4)$$

其中

$$A_3 = A_1 B_1 [1 - e^{(-\tau/B_1)}], \quad B_3 = A_2 B_2 [1 - e^{(-\tau/B_2)}].$$

此时通过双曲线拟合读数信号-光激励光 (photostimulated light, PSL) 和冷却时间 t_1 的关系, 进而求解获得 $f(t)$ 的 4 个参数 A_1, B_1, A_2, B_2 .

规格为 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 的 IP 板被 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源辐照 60 s 后冷却 30 s—24 h 等不同时间, 保证了辐照时间和冷却时间的误差小于 1.7%, 利用扫描仪读取信号并计算 PSL 值. 修正后的刻度标定结果见表 1 和图 2: 其中 BAS-SR 型的快特征时间常数为 9.3 min, BAS-TR 型的快特征时间常数为 11.7 min, 而二者慢特征时间常数均超过了 3700 min. 其误差来源于计时读数、扫描过程的时间误差和扫描时的统计误差以及置信度设置为 95% 的拟合误差.

表 1 IP 板衰退效应时间函数的参数以及文献中对应参数 [4,9,20,21]

Table 1. Parameters of fading time effect for IPs and corresponding parameters [4,9,20,21].

IP	A_1	B_1/min	A_2	B_2/min
BAS-SR	0.55	9.3	0.45	3792.2
BAS-TR	0.47	11.7	0.53	3937.2
BAS-SR ^[4]	0.27	36.0	0.33	1338
BAS-MS ^[4]	0.18	36.0	0.17	288
BAS-MS ^[9]	0.26	37.6	0.74	2604
BAS-TR ^[9]	0.49	17.9	0.51	1482
BAS-SR ^[9]	0.49	11.9	0.51	1390
BAS-MS ^[21]	0.12	49.0	0.27	335
BAS-TR ^[21]	0.31	48.0	0.25	295
BAS-TR ^[20]	0.36	33.0	0.64	2041

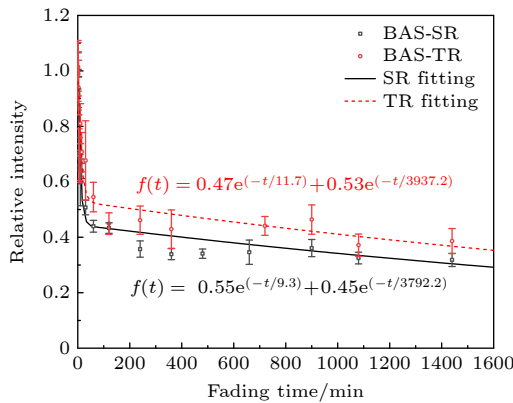


图 2 BAS-SR 和 BAS-TR 时间衰减曲线

Fig. 2. Fading time effect curves of BAS-SR and BAS-TR.

2.2 IP 板对电子的绝对灵敏度刻度

实验标定了 BAS-SR 和 BAS-TR 两种类型 IP 板的响应灵敏度. 辐照时间选为 10, 20, 30, 40, 50 和 60 s, 冷却时间为 30 min ($> 3B_1$), 辐照时间相

对于冷却时间来改变入射粒子数, 从而获得不同入射粒子数 n_e 辐照下 IP 板的响应变化. 将辐照结束的时间设定为 0 时刻, 总信号 PSL 与粒子数之间的关系如图 3 所示, BAS-SR 型的响应灵敏度约为 $0.033\text{ PSL}/e$ (photostimulated light, PSL), BAS-TR 型的响应灵敏度约为 $0.018\text{ PSL}/e$.

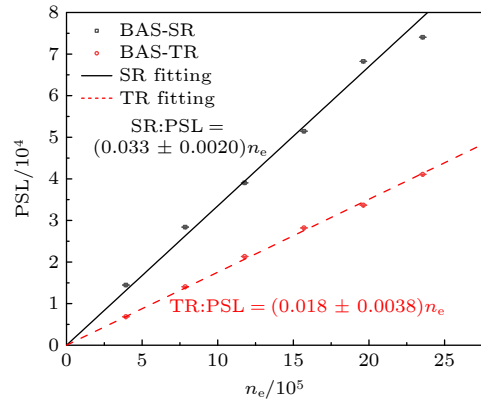


图 3 BAS-SR 和 BAS-TR 型 IP 板的 PSL 与电子数的关系
Fig. 3. Relationship between PSL and number of electron for BAS-SR and BAS-TR.

2.3 IP 板多次扫描实验

IP 板上存储的信息经过扫描仪一次扫描后还有大量信息残存在 IP 板上, 使用 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源照射 BAS-SR 型 30, 60 和 90 s, 辐照结束后每隔 20 min 扫描一次, 共扫描 10 次. 类似地, BAS-TR 型 IP 辐照时长为 60, 90, 120 和 180 s, 辐照结束后每隔 20 min 扫描一次, 共扫描 10 次. 由于辐照时长不可忽略, 依据衰减曲线对其修正, 得到了 BAS-SR 和 BAS-TR 型 IP 板扫描信号与扫描次数的关系如图 4 和图 5 所示: 随着扫描次数的增

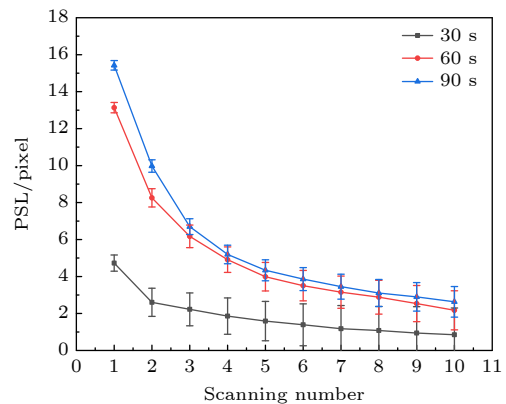


图 4 BAS-SR 型 IP 多次扫描下信号强度的变化

Fig. 4. Signal intensity decreases with the scanning number for BAS-SR.

加, IP 板读数强度逐渐降低. 前 1—5 次扫描得到的信号强度变化剧烈, 5 次扫描以后, 扫描次数对读数强度的影响逐渐减弱, 读数强度逐渐趋于稳定, 合理猜测超过一定的扫描次数读数强度为 0.

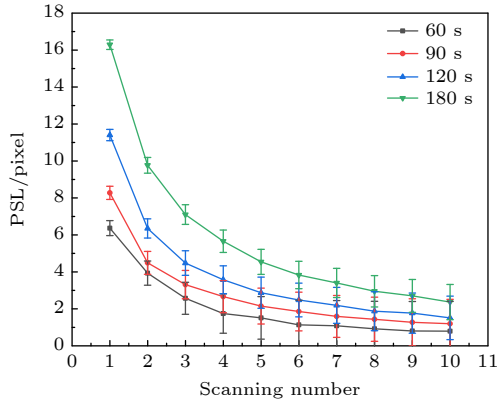


图 5 BAS-TR 型 IP 板多次扫描下信号强度变化

Fig. 5. Signal intensity decreases with the scanning number for BAS-TR.

3 光激励发光模型

3.1 模型介绍

荧光层是 IP 板的核心结构, 主要成分是掺杂了 Eu^{2+} 的碱土金属氟卤化物 BaFBr . 基于荧光层的组成成分提出的各种电子转移模型解释了 IP 板表现出的部分特性, 缺乏能够完全解释 IP 板所表现的全部特性的模型, 结合导带模型、隧穿模型和并行模型建立了一种新的光激励激发模型用于阐释 IP 板的特性.

3.2 模型的建立

辐射粒子在 IP 中沉积能量、存储信息和信息读取过程的光激励激发模型的物理机制如图 6 所示.

1) 辐照过程: 电子获得能量变为自由电子进入导带, Eu^{2+} 离子电离形成 Eu^{3+} 离子, 进入导带的电子一部分被 F^{+} -心捕获, 一部分被 F-心捕获, F^{+} -心数与 F-心之间电子处于动态平衡过程.

2) 自发过程: F^{+} -心和 F-心捕获的电子由于热效应吸收能量发生隧穿与 Eu^{3+} 离子复合, 形成激发态的 Eu^{2+} , 自发退激, 造成信号衰减.

3) 扫描过程: 扫描仪发出的 650 nm 的激光辐照, 电子吸收能量从 F-心和 F^{+} -心中逃逸进入导带和 Eu^{3+} 离子结合转化为激发态的 Eu^{2+} 离子, 激发

态的 Eu^{2+} 离子退激产生光子被扫描仪所捕获被记录下来. 由于 F^{+} -心电子数目减少, 为了维持动态平衡, F-心的电子有一部分进入 F^{+} -心.

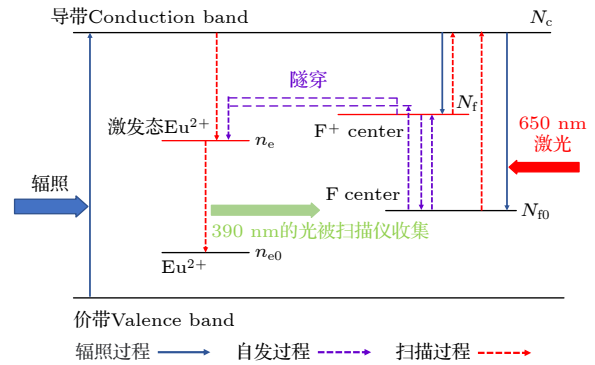


图 6 IP 记录辐射粒子的物理机制

Fig. 6. Physical mechanism of the IP records radiation particles.

基于以上 3 个过程建立光激励激发模型.

1) 电子辐照 IP 板过程. 电子束流辐照 IP 板时在荧光层沉积能量, 产生的进入导带的自由电子数目为

$$N_c = \frac{n_e E_{\text{dep}}}{E_{\text{ab}}}, \quad (5)$$

其中 n_e 为入射电子数, E_{dep} 为单个电子在灵敏层沉积的能量, E_{ab} 为电子从满带激发到导带所需的能量. 若入射电子为连续宽谱, 则在电子辐照过程中产生的亚稳态电子-空穴对为

$$N_c = \frac{1}{E_{\text{ab}}} \int_0^{+\infty} n_e(E) E_{\text{dep}}(E) dE, \quad (6)$$

激发到导带的电子容易被卤素离子的陷阱所捕获而形成 F-心和 F^{+} -心. 辐照结束后, 处在导带的电子被卤素离子的陷阱所捕获:

$$N_c = N_f + N_{f0}, \quad N_{f0} = \gamma_1 N_c, \quad (7)$$

其中 N_f 为 F^{+} -心所捕获的电子数, N_{f0} 为位于 F-心的电子数, γ_1 为比例因子.

2) F^{+} -心和 F-心捕获的电子由于热效应吸收能量发生隧穿与 Eu^{3+} 离子复合形成激发态的 Eu^{2+} , 自发退激变为基态 Eu^{2+} , 造成一部分信号消失:

$$\frac{dn_e}{dt} = w_f N_f + w_{f0} N_{f0}, \quad (8)$$

其中 w_f 为 F^{+} -心发生隧穿的概率, w_{f0} 为 F-心发生隧穿的概率. 退激变为基态 Eu^{2+} , 图 6 中 n_{e0} 为基态 Eu^{2+} 的电子数这个过程始终存在, 因此在扫描过程中表示为衰减函数 $f(t)$.

3) 信号读取过程. 扫描时, 扫描仪发出的 650 nm 的激光将 F-心和 F⁺-心的电子激发进入导带后与 Eu³⁺结合形成激发态的 Eu²⁺, 其退激释放 390 nm 的光被扫描仪收集, 变为基态 Eu²⁺.

第一次扫描时, 进入导带和退激释放 PSL 的光子数为

$$\begin{aligned} N_e^1 &= N_{f0}\delta_{f0} \cdot f(t_1) + N_f\delta_f \cdot f(t_1) \\ &= f(t_1)(N_{f0}\delta_{f0} + N_f\delta_f) \\ &= f(t_1)(N_{f0}\delta_{f0} + N_f\delta_f) \\ &= \gamma N_c f(t_1), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, δ_{f0} 和 δ_f 为 F-心和 F⁺-心的电子被激发的概率, γ 为比例因子, N_e^1 为第 1 次扫描退激释放的 PSL 的光子数. 由 (9) 式可知第一次扫描获取的信号与沉积能量存在线性关系.

扫描结束后, 打破了 F-心和 F⁺-心的动态平衡, F-心的电子将补充 F⁺-心, 重新回到平衡状态. 每次扫描 F-心的电子变化和激发态的 Eu²⁺离子为

$$\frac{dN_{f0}}{dn} = -N_{f0}w_f - N_{f0}\delta_{f0}, \quad (10)$$

$$\frac{dn_e}{dn} = N_{f0}\delta_{f0} + N_f\delta_f, \quad (11)$$

其中 w_f 为 F-心的电子跃迁到 F⁺-心的概率. 则第 n 次扫描退激释放的 PSL 的光子数 N_e^n 为:

$$N_e^n = Ae^{-a/n} + Be^{-b/n}. \quad (12)$$

4 讨论与分析

4.1 衰减曲线刻度

IP 板在辐射冷却过程中存储信号逐渐衰退, 其物理机理是热效应导致处于 F-心和 F⁺-心的电子发生隧穿效应与亚稳态的 Eu³⁺离子结合形成激发态的 Eu²⁺, 自发的退激导致信号衰减. 辐照结束初期亚稳态的 Eu³⁺离子数目较多, 此时电子与 Eu³⁺离子复合速率较高. 随着复合过程的推进, 一方面 Eu³⁺离子的减小复合速率逐渐降低, 另一方面电子数目减少, F⁺-心数与 F-心之间电子激发与复合的动态平衡过程变得缓慢. 因此导致初期 IP 板衰减效应非常严重, 随着冷却时间的延长, IP 板的衰减效应也就相应得趋于平缓. 通常对 IP 板的衰减曲线按双指数函数进行拟合分析.

本实验标定了 BAS-SR 和 BAS-TR 两种类型 IP 板的衰减时间曲线, 同时分别计算了快特征时

间常数 5 个衰减期内的冷却时间内衰退剩余百分比及衰退速率, 见表 2. 一个快成分衰减期 B_1 冷却时间后, IP 板的信号衰退剩余只有初始信号的 62%—65%, $3B_1$ 后, IP 板信号衰退剩余降低为 45% 左右, 并且变化极为缓慢, $3B_1$ — $5B_1$ 时间变化只有 2%. 实际操作过程中, IP 板放进扫描仪到读取数据的操作时间通常不会超过 1 min 其影响只有 1‰, 可以忽略不计. 因此在 IP 板使用过程中, 在辐照结束后 $3B_1$ — $5B_1$ 扫描合适, 通常选择 30—45 min 最佳.

表 2 衰退时间效应对 IP 板读数信号强度的影响
Table 2. Signal intensity decreases with fading time.

冷却时间	BAS-SR		BAS-TR	
	衰退剩余/%	衰退速率/%	衰退剩余/%	衰退速率/%
B_1	65.12	2.19	62.16	1.49
$2B_1$	52.22	0.81	51.09	0.56
$3B_1$	47.41	0.31	46.94	0.21
$4B_1$	45.57	0.12	45.33	0.09
$5B_1$	44.82	0.05	44.65	0.05

4.2 IP 板对 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 电子源的绝对灵敏度刻度

本实验采用的 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 电子源是一个连续宽谱的电子源, 其中 ⁹⁰Sr 的电子截止能量为 546 keV, 平均能量为 195.8 keV, 半衰期 28.79 a; ⁹⁰Y 的电子截止能量为 2.28 MeV, 平均能量为 933.7 keV, 半衰期为 64.1 h. 表 3 列出了不同的团队通过实验与模拟相结合计算了 IP 板对电子的灵敏度刻度, 其结果也不尽相同, 原因在于模拟计算软件的不同: 例如 Bonnet 等^[8]利用 Geant4 模拟计算得到;

表 3 IP 板对电子的灵敏度^[8,12,13,15]
Table 3. Sensitivity of IP to different energy of electrons^[8,12,13,15].

实验室/ IP板类型	$E_0 = 196$ keV 灵敏度(PSL/e)	$E_0 = 934$ keV 灵敏度(PSL/e)
CENBGR/ BAS-SR ^[8]	0.037	0.015
CENBGR/ BAS-TR ^[8]	0.025	0.007
LLNL/ BAS-SR ^[13]	0.037	0.009
ILE/BAS-SR ^[12]	0.030	0.010
ELI/BAS-SR ^[15]	0.0299	0.012
BAS-SR	0.030	0.033
BAS-TR	0.024	0.018

Tanaka 等^[12]利用 EGS4 模拟计算得到; 2008 年, Chen 等^[13]利用 MCNPX 模拟计算得到; Singh 等^[15]使用 FLUKA 模拟计算能量沉积. 实验中 IP 板对辐射粒子的绝对刻度非常依赖于 IP 板的类型、扫描设备和实验环境. 此外, 该结果进一步表明, IP 板在使用过程中必须经常根据实验安排定期开展标定刻度工作.

4.3 多次重复扫描刻度

结合多次扫描实验的数据, 基于第一次扫描结果进行了归一化处理, 对其求平均值后进行拟合. BAS-SR 和 BAS-TR 多次扫描结果拟合曲线图像如图 7 和图 8 所示, 在置信边界为 95% 的情况下, BAS-SR 和 BAS-TR 多次扫描的平均值拟合曲线图像拟合优度分别为 0.998 和 0.999. 从图中可以看出, 多次扫描过程基本符合 (12) 式的双指数函数分布规律, 因为扫描的过程中电子与 Eu^{3+} 形成激发态的 Eu^{2+} 有两种方式, 其中 F-心中的电子为主要部分, 且激发速度较快, F⁺-心的电子其贡献较

小而且存在动态平衡的过程激发速度较慢. 同时当辐照信息超过 IP 板读数扫描系统的动态范围时导致信号读取系统发生饱和, 可以通过多次扫描将过饱和信息衰退到非饱和状态, 并利用多次扫描外推法进行计算分析.

5 结 论

利用 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 电子源对 BAS-SR, BAS-TR 两种类型 IP 板进行刻度, 同时建立光激励发光机理模型阐述 IP 板的时间衰减特性、绝对灵敏度响应以及多次扫描的规律. 时间衰减特性表明 IP 板在辐照后应当进行冷却, 在慢衰退过程时间段进行信号测量以降低衰减过程中读数时间误差带来的影响, 通常选择为快特征时间常数的 3—5 倍, 为 30—50 min. 冷却时间过短会导致读数误差变大, 冷却时间过长会导致大量信息流失, 无法准确获取低剂量辐照的信息.

IP 板的灵敏度刻度不同, 很大原因在于 IP 板的型号、扫描仪参数的设置以及所处的实验环境. 此外宽谱 β 源的能谱积分效应对灵敏度刻度产生较大影响, 该方法仅适合于粗略评估 IP 板的灵敏度特性参数, IP 板的灵敏度能量响应曲线尚需要加速器单能电子标定. 此外, 系统性研究了两种类型 IP 板的多次扫描过程及其信号规律, 结果显示 IP 板多次扫描下读取的信号近似满足双指数函数分布, 与物理模型的预测基本一致. 为今后进一步深入研究 IP 板的工作机理以及过饱和条件下的数据外推提供了理论模型和数据基础.

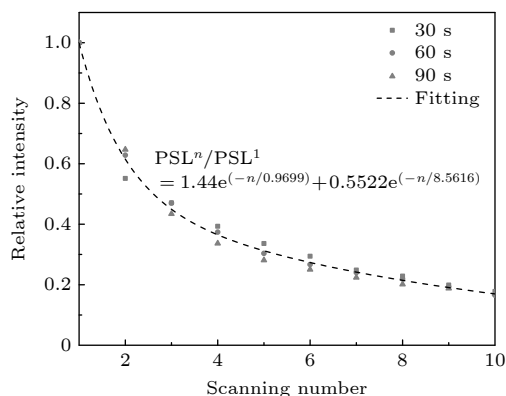


图 7 BAS-SR 型 IP 板多次扫描规律曲线

Fig. 7. Multiple scanning regular curve of BAS-SR.

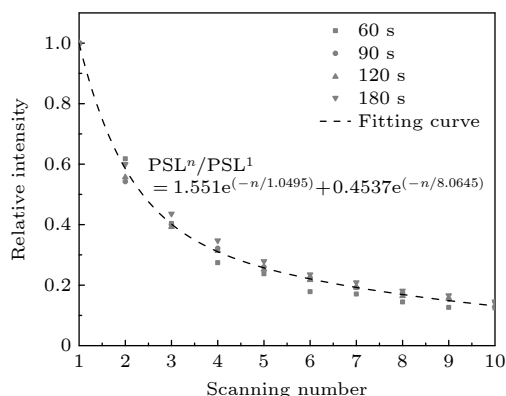


图 8 BAS-TR 型 IP 板多次扫描规律曲线

Fig. 8. Multiple scanning regular curve of BAS-MS.

参考文献

- [1] Danson C N, Haefner C, Bromage J 2019 *High Power Laser Sci.* **7** 54
- [2] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1229
- [3] Huang J W, Li D H, Dang Y L, Wu D, Wang N Y, Hao Y M 2017 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **37** 559 (in Chinese) [黄建微, 李德红, 党永乐, 吴笛, 王乃彦, 郝艳梅 2017 *核电子学与探测技术* **37** 559]
- [4] Zeil K, Kraft S D, Jochmann A, Kroll F, Jahr W, Schramm U, Karsch L, Pawelke J, Hidding B, Pretzler G 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 013307
- [5] Gales S G, Bentley C D 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4001
- [6] Busold I S, Philipp K, Otten A, Roth M 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 113306
- [7] Sun L, Wang Y S, Dong J F, He Z Y, Xu Z 2001 *Laser Infrared* **31** 269 (in Chinese) [孙力, 王永生, 董金凤, 何志毅, 徐征 2001 *激光与红外* **31** 269]

- [8] Bonnet T, Comet M, Denis-Petit D, Gobet F, Hannachi F, Tarisien M, Versteegen M, Aléonard M M 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 103510
- [9] Bonnet T, Comet M, Denis-Petit D, Gobet F, Hannachi F, Tarisien M, Versteegen M, Aleonard M M 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 103508
- [10] Williams G, Jackson M, Brian R, Chen H, Kojima S 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 11E604
- [11] Ohuchi H, Yamadera A, Nakamura T 2000 *Nucl. Instrum. Meth. A* **450** 343
- [12] Tanaka K A, Yabuuchi T, Sato T, Kodama R, Kitagawa Y, Takahashi T, Ikeda T, Honda Y, Okuda S 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 013507
- [13] Chen H, Back N L, Bartal T, Beg F N, Eder D C, Link A J, MacPhee A G, Ping Y, Song P M, Throop A, Van Woerkom L 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 033301
- [14] Rabhi N, Bohacek K, Batani D, Boutoux G, Ducret J E, Guillaume E, Jakubowska K, Thauray C, Thfoin I 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 053306
- [15] Singh S, Slavicek T, Hodak R, Versaci R, Pridal P, Kumar D 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 075105
- [16] Takahashi K, Kohda K, Miyahara J 1984 *J. Lumi.* **31** 266
- [17] Von Seggern H, Voigt T, Knüpfer W, Lange G 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 1405
- [18] Von Seggern H 1999 *Brazilian J. Phys.* **29** 254
- [19] Zhao H, Wang Y S, Xu Z, Hou Y B, Xu X 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 333 (in Chinese) [赵辉, 王永生, 徐征, 侯延冰, 徐叙 1998 *物理学报* **47** 333]
- [20] Golovin D O, Mirfayzi S R, Shokita S, Abe Y, Lanl Z, Arikawa Y, Morace A, Pikuz T A, Yogo A 2021 *J. Instrum.* **16** T02005
- [21] Qi J M, Zhang F Q, Chen J C, Xie H W 2014 *Chin. Phys. C* **38** 016001

Luminescence principle and characteristics of imaging plate^{*}

Wang Hao-Ran¹⁾²⁾³⁾ Tian Bao-Xian³⁾ Bo Nan¹⁾²⁾³⁾ Liu Fu-Long³⁾

He Chuang-Ye³⁾ Jia Shao-Qing⁴⁾ Guo Bing³⁾ Wang Nai-Yan^{3)†}

1) (*College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

3) (*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

4) (*Atomic High Technol Company, Ltd, Beijing 102413, China*)

(Received 12 April 2023; revised manuscript received 12 June 2023)

Abstract

The imaging plate (IP) is a reusable detector for detecting radiation particles in a complex electromagnetic field environment, and it is widely used as a detection medium in laser-accelerated particle beam diagnostic equipment. Therefore, it is necessary to study the performance characteristics and physical mechanism of IP. An electron source with known activity is used to explore the performance characteristics of IP. A $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ electron source is used to measure the time attenuation curve, calibrate the absolute sensitivity, and study the law of multiple scanning of BAS-SR and BAS-TR. In the case of a longer irradiation, the fading cannot be neglected, and the attenuation curves are modified. The time attenuation characteristics indicate that the IP should be cooled after irradiation, and the scanning should be carried out in the slow decay process to reduce the influence of the reading error in the decay process. The absolute sensitivity of BAS-SR and BAS-TR to $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ source are (0.033 ± 0.002) PSL/ e and (0.018 ± 0.0038) PSL/ e (photostimulated light, PSL), respectively, which are consistent with the results of most absolute sensitivity. The absolute sensitivity is closely related to the type of IP, scanning equipment, and experimental environment. In addition, the energy spectrum integral effect of the broad spectrum β source has a significant influence on the absolute sensitivity. This method is only suitable for the rough evaluation of the sensitivity characteristic parameters of the IP. Multiple scanning approximately satisfies the double exponential function distribution, which is consistent with the physical model. The characteristics of IP are determined by its storage principle. The fluorescence layer of IP is composed of typical electron trapping materials $\text{MF}X$ ($M = \text{Ca, Sr, Ba}$; $X = \text{Cl, Br, I}$) alkaline earth metal fluorhalide BaFBr . When the IP is irradiated, a large number of free electron-hole pairs are excited by the deposited energy in the material, and the free electrons will be captured by the electron trap, so the fluorescence layer of the IP records the radiation particles' information through the energy deposited. In this paper, we study three kinds of models. Based on the models, a photo-stimulated luminescence model is proposed to describe the electron transfer process. The photo-stimulated luminescence model describes the physical mechanism of energy deposition, information storage, and information scanning of radiation particles. The relationship between the physical mechanism and characteristics is explained effectively by combining the microscopic mathematical model with the macroscopic physical phenomenon. It provides a specific data basis for the subsequent application of IPs in laser plasma diagnostic experiments.

Keywords: imaging plate, characteristics, photo-stimulated luminescence

PACS: 52.38.-r, 07.81.+a, 07.77.Ka

DOI: 10.7498/aps.72.20230587

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11935008).

[†] Corresponding author. E-mail: wangny@bnu.edu.cn

成像板发光原理及其特性

王浩然 田宝贤 薄楠 刘伏龙 贺创业 贾少青 郭冰 王乃彦

Luminescence principle and characteristics of imaging plate

Wang Hao-Ran Tian Bao-Xian Bo Nan Liu Fu-Long He Chuang-Ye Jia Shao-Qing Guo Bing
Wang Nai-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 165201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230587

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230587>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于神光III原型装置开展的激光直接驱动准等熵压缩研究进展

Progress of laser-driven quasi-isentropic compression study performed on SHENGUANG III prototype laser facility

物理学报. 2018, 67(4): 045202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172159>

光源尺寸和光谱带宽对波带板成像的影响

Influence of source size and spectral bandwidth on the imaging of a zone plate

物理学报. 2019, 68(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181236>

基于分数阶螺旋相位片的定量相位显微成像

Quantitative phase microscopy imaging based on fractional spiral phase plate

物理学报. 2021, 70(15): 158702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201884>

基于稀疏低秩特性的水下非均匀光场偏振成像技术研究

Clear underwater vision in non-uniform scattering field by low-rank-and-sparse-decomposition-based polarization imaging

物理学报. 2021, 70(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210314>

侧向局域共振超构板声振特性

Vibro-acoustic performance of acoustic metamaterial plate with periodic lateral local resonator

物理学报. 2021, 70(21): 214301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210595>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>