

X 射线影像存储材料读写信号的关系*

赵辉 王永生 徐征 徐叙琰

(北方交通大学光电子技术研究所 北京 100044)

提要 通过对光激励发光读出过程中各种电子转移过程的分析,建立了描述该过程的动力学方程组,通过求解在理论上得出了 X 射线影像存储材料中读写信号之间的线性关系。制备了 X 射线影像存储材料 $BaFCl:Eu^{2+}$,通过光谱测试在实验上验证了这一关系。

关键词 光激励发光, X 射线, 读出过程

1 引言

基于光激励发光现象的 X 射线影像存储材料在医疗、无损检测、电镜照相等 X 射线检测领域获得了广泛的应用。光激励发光过程可简述如下: X 射线辐照使材料中产生大量的自由电子,它们可被陷阱俘获,完成存储过程。若陷阱足够深,这些信息可保存很长时间。读出时用长波光照,电子受激励而离开陷阱到达发光中心复合发光,从而完成读出过程。在应用中, X 射线辐照剂量是写入信号,激励时的发光强度是读出信号。读写信号之间的关系是该领域的一个基本问题。本文从理论和实验两个方面,对该问题进行了研究。

2 理论分析

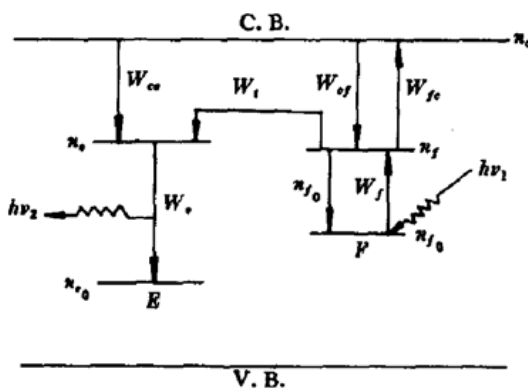


图 1 X 射线影像存储材料的读出过程
Fig. 1 Readout process of the X-ray image storage material

图 1 示出了 X 射线影像存储材料的能级情况和读出过程中电子转移的各种途径。其中 F 为材料中阴离子空位形成的 F 色心(电子陷阱), E 代表发光中心。 $n_{f_0}, n_f, n_c, n_e, n_{e_0}$ 分别是 F 色心基态、激发态、导带、发光中心激发态、基态的电子布居数。X 射线辐照时, 激发的电子被陷阱俘获, 暂态过程结束后, 材料中的电子分布状态可用下式表示^[1]

$$\begin{cases} n_e = n_c = n_f = 0 \\ n_{f_0} = \gamma D \end{cases} \quad (1)$$

式中 D 为 X 射线辐照剂量, γ 为比例因子。(1)式为读出过程的初始条件。

* 国家自然科学基金资助项目。

读出时,读出光照射材料使色心基态电子跃迁至激发态,此时电子有三种可能:弛豫回色心基态;热激发至导带^[2];隧穿至发光中心复合发光^[3]。读出过程中各种电子转移途径及其相应的概率如图 1 中所示。在以上分析的基础上,可列出描述读出过程的动力学方程组

$$\begin{cases} \frac{dn_{f_0}}{dt} = n_f W_f - n_{f_0} W_{f_0} \\ \frac{dn_f}{dt} = n_{f_0} W_{f_0} + n_c W_{cf} - n_f W_{fc} - n_f W_f - n_f W_t \\ \frac{dn_c}{dt} = n_f W_{fc} - n_c W_{cf} - n_c W_{ce} \\ \frac{dn_e}{dt} = n_c W_{ce} + n_f W_t - n_e W_e \\ \frac{dn_{e_0}}{dt} = n_e W_e \end{cases} \quad (2)$$

取近似条件 $W_{nf} \ll W_{f_0} n_{f_0}$, 我们求解了该方程组, 得出读出过程中发光强度为

$$I(t) \propto W_e n_e(t) = \frac{W_e \gamma_1 D}{W_{f_0}^2 - a_1 W_{f_0} + a_2} (E_1 e^{r_1 t} + E_2 e^{r_2 t} + E_3 e^{-W_{f_0} t} + E_4 e^{-W_e t}) \quad (3)$$

式中

$$E_1 = \frac{W_{f_0} + r_2}{(W_e + r_1)(r_1 - r_2)} \left[W_{ce} + \frac{W_t}{W_{fc}} (W_{cf} + W_{ce} + r_1) \right]$$

$$E_2 = \frac{W_{f_0} + r_1}{(W_e + r_2)(r_2 - r_1)} \left[W_{ce} + \frac{W_t}{W_{fc}} (W_{cf} + W_{ce} + r_2) \right]$$

$$E_3 = \frac{1}{W_e - W_{f_0}} \left[W_{ce} + \frac{W_t}{W_{fc}} (W_{cf} + W_{ce} - W_{f_0}) \right]$$

$$E_4 = - (E_1 + E_2 + E_3)$$

$$r_1 = \frac{1}{2} (-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2}) \quad r_2 = \frac{1}{2} (-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2})$$

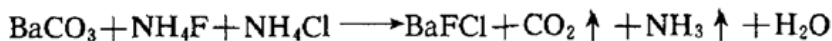
$$a_1 = W_{cf} + W_{ce} + W_{fc} + W_f + W_t \quad a_2 = (W_{fc} + W_f + W_t)(W_{cf} + W_{ce}) - W_{fc} W_{cf}$$

γ_1 为比例因子。由此可见, $I(t)$ 与 D 之间存在严格的线性关系。

3 实 验

3.1 材料制备

将一定配比的 BaCO_3 , NH_4F , NH_4Cl , Eu_2O_3 混合研磨, 在 400°C 下烧结 1 h, 使其脱去结晶水。取出材料后冷却至室温, 重新研磨。将炉温升至 760°C , 再烧结 2 h, 同时通入 $(\text{N}_2 + 5\% \text{H}_2)$ 的气氛。反应方程式为



Eu 离子的掺杂浓度为 1%。制备的材料经 X 射线衍射分析, 确定为 PbFCl 型单一物相结构。

3.2 光谱测试

利用日立 F-4010 型分光光度计, 测量了其激发光谱、发射光谱和光激励谱(读出时发光强度随激励波长的变化关系), 得出了其最佳发射波长为 386 nm, 读出时最佳激励波长为 450 nm 或 550 nm。在此基础上, 我们对读写信号的关系进行了测试, 测试系统如图 2 所示。首先打

开 X 光机,用 X 射线(10 mA, 35 kV)辐照样品一定时间,关闭 X 光机。打开激励单色仪,以 450 nm 的光激励样品,用接收单色仪监测样品在 386 nm 处的发光。改变 X 射线辐照的时间,保持其它条件不变,重复上述过程,即测得了光激励发光强度与 X 射线辐照时间(即辐照剂量)的关系,如图 3 所示。测量中在激励单色仪与样品之间放置了 350 nm 的滤波片,以防止激励单色仪二次谐波的光激发样品;每次辐照前都先将样品漂白,以避免上次辐照对本次实验的干扰。由图 3 可见,光激励发光强度与 X 射线辐照剂量在仪器所能测量的 5 个数量级内为线性关系。

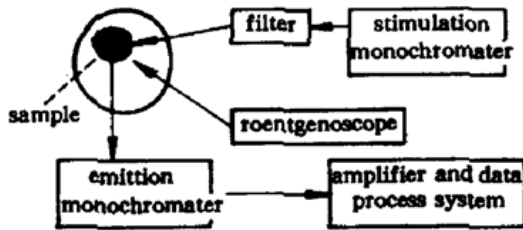


图 2 光谱测试系统图

Fig. 2 Schematic diagram of the spectral measurement system

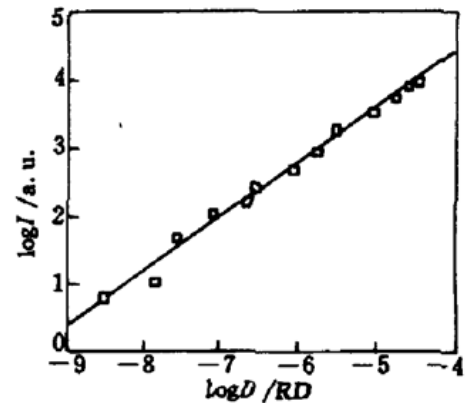


图 3 发光强度与 X 射线辐照剂量的关系

Fig. 3 The relationship between luminescence and X-ray irradiation dose

参 考 文 献

- 1 H. von Seggern, T. Voigt. Physical model of photostimulated luminescence of X-ray irradiated BaFBr:Eu²⁺. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3): 1405~1412
- 2 Kenji Takahashi, K. Kohda, J. Miyahara *et al.*. Mechanism of photostimulated luminescence in BaFX:Eu²⁺ (X=Cl, Br) phosphors. *J. of Luminescence*, 1984, **31&32**: 266~268
- 3 D. W. de Leeuw, T. Kovats, S. P. Herko. Kinetics of photostimulated luminescence in BaFBr:Eu²⁺. *J. Electron Chem. Soc.; Solid-state Science and Technology*, 1987, (2): 491~496

The Relationship between Readout and Write-in Signals in X-ray Image Storage Material

Zhao Hui Wang Yongsheng Xu Zheng Xu Xurong

(Institute of Optoelectronic Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract The electron transfer process in photostimulated luminescence is studied and a set of equations are set up. The linear relationship between readout and write-in signals in X-ray image storage materials is obtained theoretically by solving these equations. This result is confirmed in the experiments of BaFCl:Eu²⁺.

Key words photostimulated luminescence, X-ray, readout