

## 掺铁铌酸锂晶体的光电导衰减特性研究

陈小兰 张耘<sup>†</sup> 冉启义

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2012年7月7日收到; 2012年8月26日收到修改稿)

利用电化学分析仪对掺铁同成分铌酸锂晶体进行瞬态光电导研究. 以不同掺铁浓度铌酸锂晶体为样品, 在不同强度的纳秒级脉冲光照射下对光电导的研究发现: 铌酸锂晶体的瞬态光电导是由较为复杂的电子迁移过程形成, 其衰减可以用一个指数函数叠加一个扩展指数来拟合. 拟合参数与光强、掺铁浓度存在以下依赖关系: 入射光强增强时, 幅值  $\sigma_1^{\max}$ 、 $\sigma_2^{\max}$ 、时间常数  $\tau_2$  和扩展因子  $\beta$  值增大, 在光强增大到一定时,  $\tau_2$  和  $\beta$  出现饱和; 晶体的掺铁浓度升高时,  $\sigma_1^{\max}$ 、 $\sigma_2^{\max}$ 、 $\tau_2$  值增大, 而  $\beta$  值减小. 根据实验结果, 从理论上提出了光电子导带迁移伴随光电子在小极化子上跳跃迁移的复合电荷传输模型. 该模型较好地解释了掺铁同成分铌酸锂晶体的光电导的衰减特点.

**关键词:** 铌酸锂晶体, 光电导, 暗衰减, 电荷传输

**PACS:** 72.20.Jv, 42.70.Nq

**DOI:** 10.7498/aps.62.037201

## 1 引言

光折变晶体是当前光电等领域应用广泛的功能材料, 其中掺铁铌酸锂晶体因其在全息存储、光波导、光电调制器等方面的应用而成为研究最多的光折变晶体之一<sup>[1,2]</sup>. 掺铁铌酸锂晶体材料内部的电荷传输几乎涉及到所有光电应用, 特别是全息存储的应用<sup>[3]</sup>——光致电荷传输正是该应用的基础. 对光致电荷传输机理的深入研究, 可以更好地了解光电过程的微观机理, 充分利用材料的相应特性, 从而实现应用的优化.

描述掺铁铌酸锂晶体光致电荷传输的模型一般有两种: 一种是双中心模型<sup>[4-6]</sup>, 一种是电荷跳跃传输模型<sup>[7-9]</sup>. 两种模型给出了不同的电荷传输微观机理: 在前一个模型中, 电子受光激发从  $\text{Fe}^{2+}$  中心跃迁至导带, 在导带中迁移, 随后被  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$  暂时俘获, 形成小极化子  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{4+}$ , 最后复合到  $\text{Fe}^{3+}$  中心; 在后一个模型中, 电子从  $\text{Fe}^{2+}$  直接激发到  $\text{Nb}^{5+}$  上, 受热激发在  $\text{Nb}^{5+}$  间随机跳跃运动, 随后被  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$  俘获, 形成小极化子, 但小极化子不稳定, 受热激发电子重新回到  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$  上继续跳跃迁移, 最终被  $\text{Fe}^{3+}$  复合. 上述两种模型, 哪种更接近晶体内实际的光致

电荷传输机理呢? 光折变实验 (PR) 和稳定光电导实验 (PC) 很难区分这两种传输机理. 因此, 需要设计一种新的实验, 进一步研究掺铁铌酸锂晶体内部的电荷传输机理.

本文通过对不同掺铁浓度的同成分铌酸锂晶体 CLN 在高强度 ( $I > 10^3 \text{ W/cm}^2$ ) 短脉冲绿光照射下的光电导及其暗衰减测量, 研究光电子在晶体内部的微观传输机理, 提出了与实验结果相符合的一种复合电荷传输模型.

## 2 实验装置

实验样品为四块掺铁 CLN 晶体, 掺铁浓度  $[\text{Fe}]/[\text{Nb}]$  依次为 0.02 mol%, 0.04 mol%, 0.06 mol%, 0.08 mol%, 分别标记为  $\text{CLN}_1$ ,  $\text{CLN}_2$ ,  $\text{CLN}_3$ ,  $\text{CLN}_4$ , 所有晶体的二、三价铁浓度之比均为  $N_{\text{Fe}^{2+}}/N_{\text{Fe}^{3+}} \approx 0.2 \pm 0.01$ . 晶体面抛光均为  $\pm Y$ , 尺寸均为  $8.0 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ . 晶体均系原生态.

本实验采用电化学分析仪的计时电流法来测算晶体的瞬时光电导. 实验装置如图 1 所示, 所有测量均在室温下进行. Nd:YAG 发出的脉冲光经调  $Q$ 、倍频 (波长 532 nm, 脉宽约 20 ns, 频率为 1 Hz, O 光) 扩束后通过窗口均匀照射到整个晶体表面 (Y

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: yzhang@swu.edu.cn

面), 晶体  $\pm Z$  面涂上导电银漆粘附铜丝后与电化学分析仪连接, 置于开窗的微电流放大器中. 晶体  $\pm Z$  所加电压恒定为 1 V. 晶体表面被激光均匀辐照, 扩散电流可忽略不计, 且辐照激光是短脉冲光, 使得由光伏效应引起的光伏传输长度非常短, 光伏电流对光电流的贡献也可忽略不计<sup>[9]</sup>. 光电流可表为

$$j(I) = \sigma_{ph}E, \quad (1)$$

光电导表示为

$$\sigma_{ph}(t) = \frac{i(t)d}{Us}, \quad (2)$$

其中  $d$  表示  $\pm Z$  面之间的距离,  $s$  是  $d \pm Z$  面的面积,  $U$  为加在  $\pm Z$  面间的电压. 每次测量仅让一个脉冲通过晶体, 且测量前将铜丝短接两分钟, 以避免晶体内可能出现空间电荷场.

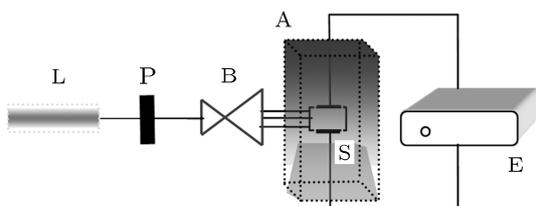


图1 光电导测量装置图 L, 激光器; P, 偏振片; B, 扩束镜; A, 微电流放大器; S, 样品; E, 电化学分析仪

### 3 实验结果

#### 3.1 光电导暗衰减的拟合

利用强度为  $0.5 \text{ MW/cm}^2$  的绿脉冲光辐照晶体, 光电导的瞬时响应图及衰减情况如图 2 所示.

激光在  $t = 0 \text{ s}$  时通过晶体, 光电导迅速增大到最大值, 然后逐渐减小直到完全消失, 弛豫时间约  $9 \text{ ms}$ . 现对铌酸锂晶体光电导的暗衰减部分进行研究, 其中时间采用对数坐标表示, 我们发现光电导暗衰减呈现两个部分 (图 3). 我们试用双指数函数

$$\begin{aligned} \sigma_{ph}(t) = & \sigma_1(t = t_p) \exp(-t/\tau_1) \\ & + \sigma_2(t = t_p) (\exp(-t/\tau_2))^\beta \end{aligned} \quad (3)$$

拟合, 但是拟合的结果并不好, 换用指数函数加扩展指数函数 (4) 进行拟合, 得到了很好的拟合结果

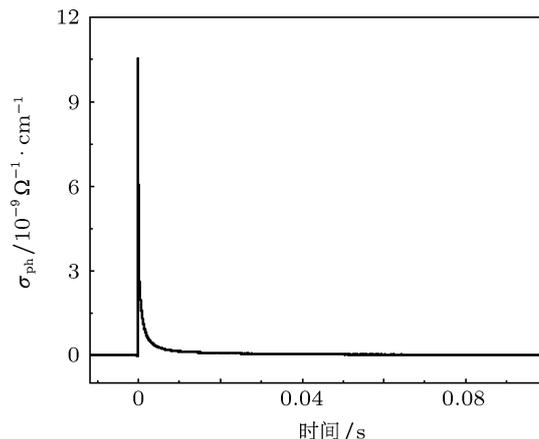


图2 光电导随时间的衰减曲线 (样品 CLN<sub>1</sub>, 光强为  $5.1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ )

(图 3 插图).

$$\begin{aligned} \sigma_{ph}(t) = & \sigma_1(t = t_p) \exp[-(t/\tau_1)] \\ & + \sigma_2(t = t_p) \exp[-(t/\tau_2)^\beta], \end{aligned} \quad (4)$$

该函数有 5 个独立的拟合参数: 幅值  $\sigma_1(t = t_p) = \sigma_1^{\max}$ ,  $\sigma_2(t = t_p) = \sigma_2^{\max}$ ; 时间常数  $\tau_1, \tau_2$ ; 扩展因子  $\beta$ . 拟合值见表 1.

表 1 拟合参数值

$\sigma_1^{\max}/\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\sigma_2^{\max}/\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\tau_1/\mu\text{s}$	$\tau_2/\mu\text{s}$	$\beta$
$3.80 \times 10^{-9}$	$2.80 \times 10^{-9}$	64.5	721.3	0.6

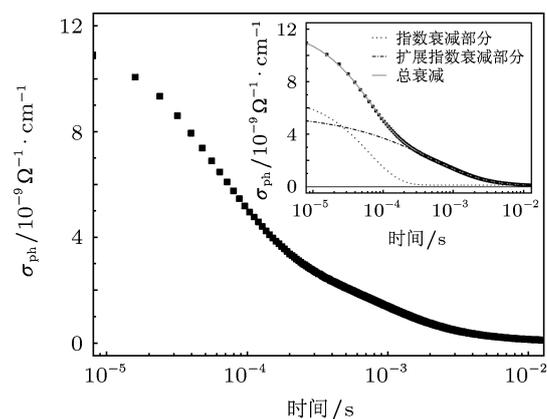


图3 同成分 LN:Fe 晶体光电导的衰减曲线及其拟合结果 (插图) (掺铁浓度  $[\text{Fe}]/[\text{Nb}] = 0.02 \text{ mol}\%$ , 脉冲光强  $I = 0.5 \text{ MW/cm}^2$ )

#### 3.2 各参数与光强、掺铁浓度的关系

我们发现所有样品在不同脉冲光强度辐照下,  $\sigma_{ph}(t)$  均能用函数 (4) 式描述. 为探究光强和掺铁浓度的影响, 我们在  $3.6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2 \leq I \leq 8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  范围内改变光强, 测量掺铁浓度不同

样品. 如预期一样, 所有样品的  $\sigma_1^{\max}$  和  $\sigma_2^{\max}$  都随脉冲光强度的增加而增加 (图 4). 同一光强下, 掺铁浓度越大,  $\sigma_1^{\max}$  和  $\sigma_2^{\max}$  值越大.

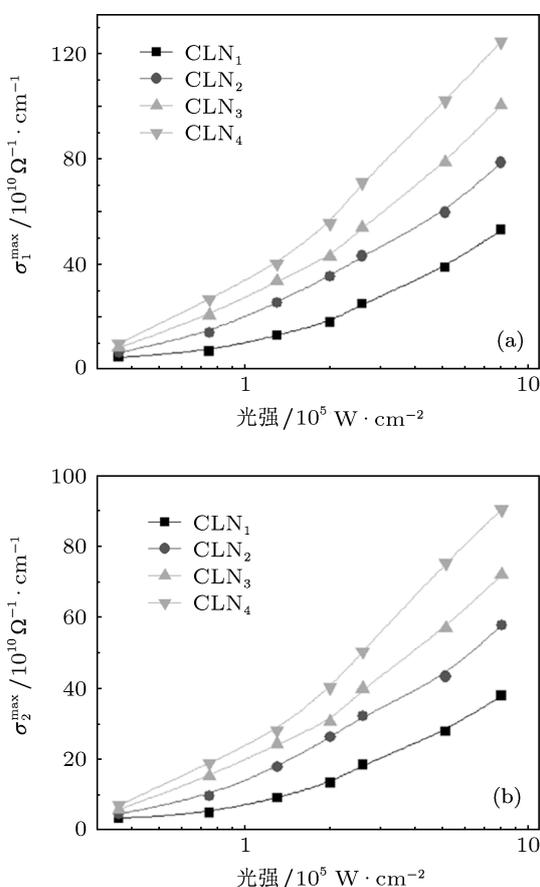


图 4 光电导衰减拟合参数  $\sigma_1^{\max}$  和  $\sigma_2^{\max}$  随脉冲光强度的变化关系

光电导暗衰减的快慢由时间常量  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  和扩展因子  $\beta$  决定. 在所有实验条件下,  $\tau_1 \approx (64.5 \pm 0.2)\mu\text{s}$ , 不受脉冲光强和掺铁浓度的影响.  $\tau_2$  的值比  $\tau_1$  约大一个数量级, 随光强从  $338.8 \mu\text{s}$  增加到  $720.3 \mu\text{s}$ .  $\beta$  值的变化范围为  $0.3 \leq \beta \leq 0.6$ . 图 5(a) 和 5(b) 分别给出了具体的  $\tau_2(I)$  和  $\beta(I)$ . 在低光强范围内,  $\tau_2$  和  $\beta$  的值迅速增大, 光强增加到  $5.1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,  $\tau_2$  和  $\beta$  值达到饱和. 在同一光强下, 随着掺铁浓度的增加,  $\beta$  的值在增加, 而  $\tau_2$  的值在减小, 但在高光强范围内,  $\beta$  不再受掺铁浓度的影响, 各晶体的  $\tau_2$  均约等于 0.6.

#### 4 分析与讨论

根据双中心模型, 光电导表示为  $\sigma_{\text{ph}}(t) = e\mu_1 n(t)$  ( $\mu_1$  为电子在导带中的迁移率,  $n$  为导带电子

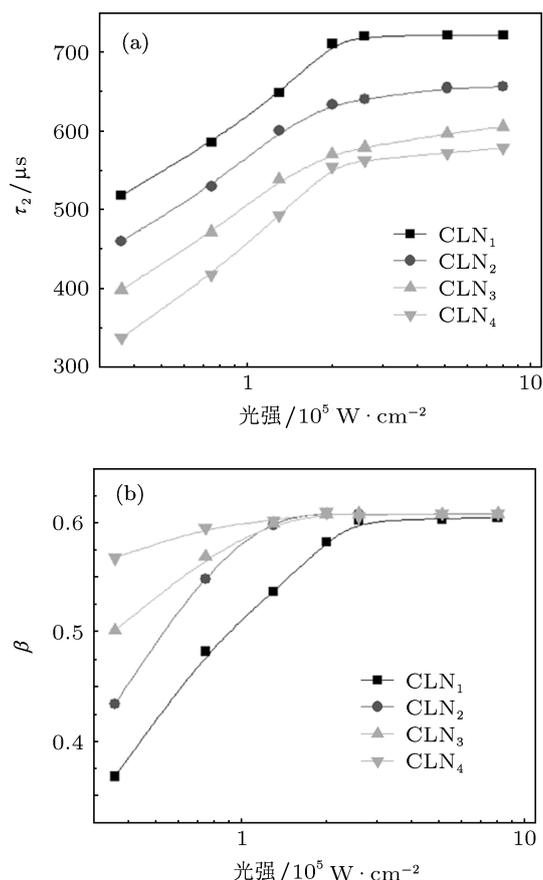


图 5 光电导衰减拟合参数  $\tau_2$  和  $\beta$  随脉冲光强度的变化关系

数密度), 光电导的衰减形式由导带电子的衰减过程决定, 因此光电导将以指数的形式衰减. 根据电荷跳跃模型,  $\sigma_{\text{ph}}(t) = e\mu_2 N_{\text{Nb}^{4+}}(t)$  ( $\mu_2$  为在电子  $\text{Nb}^{5+}$  间的跳跃迁移率,  $\text{Nb}^{4+}$  为小极化密度), 已有大量的实验证明, 小极化子是以扩展指数  $N_{\text{Nb}^{4+}}(t)/N_{\text{Nb}^{4+}}(0) = \exp[-(t/\tau)\beta]$  衰减<sup>[11,12]</sup>, 因此, 光电导将以扩展指数的形式衰减. 根据实验结果, 当脉冲光过后, 光电导是以一个指数函数和一个扩展指数叠加形式衰减, 如图 3 所示. 表明双中心模型和电荷跳跃传输模型均不能对本实验给予很好的解释, 但可以合理推测, 光激发的电子一部分在导带迁移, 另一部分自陷到  $\text{Nb}^{4+}$  上跳跃迁移.

基于以上分析, 建立如图 6 所示的电荷传输模型. 在此模型中, 电子受光激发从  $\text{Fe}^{2+}$  中心跃迁至导带, 一部分光电子通过导带迁移; 另一部分光电子由导带自陷到到离源  $\text{Fe}^{2+}$  中心最近的  $\text{Nb}_{\text{Nb}}^{5+}$  上, 形成自由小极化子, 受热激发电子会在自由小极化子上随机跳跃, 在电场的作用下, 受激电子在宏观上出现定向迁移, 最终复合到受主中心  $\text{Fe}^{3+}$  上.  $\text{Fe}$  离子和反位铌 ( $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$ ) 一样都占锂位, 随机运动的电

子在复合到受主  $\text{Fe}^{3+}$  前, 会暂时被晶体中密度更大的  $\text{Nb}_{\text{Li}}^{5+}$  俘获, 形成束缚小极化子. 要使电子从这更深的陷阱激发出来, 需要更大的激活能, 导致光电子有更长的寿命.

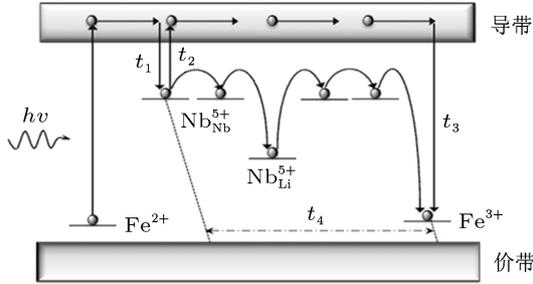


图6 电荷传输模型

通常小极化子上的电子跳跃的路径不同、距离不同, 这就导致各电子的寿命一般不同, 因此那部分从小极化子复合到  $\text{Fe}^{3+}$  中心的电子的寿命不是一个值, 而是形成了寿命谱, 是这些电子的平均寿命. 假设小极化子上的电子寿命都等于平均寿命, 图6的模型简化为双中心模型. 因此, 我们以带输运动力学方程为基础来分析光电导的瞬时衰减情况.

当短脉冲光强度均匀照射在晶体上时, 描述晶体内部导带电子沿  $C$  轴方向电荷传输的基本方程为

$$\frac{dN_{\text{Fe}^{3+}}}{dt} = sIN_{\text{Fe}^{2+}} - r'nN_{\text{Fe}^{3+}} - r''N_{\text{Nb}}N_{\text{Fe}^{3+}}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_{\text{Nb}^{5+}}}{dt} = -rnN_{\text{Nb}^{5+}} + BN_{\text{Nb}^{4+}} + r''N_{\text{Nb}^{4+}}N_{\text{Fe}^{3+}}, \quad (6)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dN_{\text{Fe}^{3+}}}{dt} + \frac{dN_{\text{Nb}^{5+}}}{dt}, \quad (7)$$

$$j = (e\mu_1n + e\mu_2N_{\text{Nb}^{4+}})E, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{ph}} = e\mu_1n + e\mu_2N_{\text{Nb}^{4+}}, \quad (9)$$

式中  $n$  为导带电子密度,  $N_{\text{Fe}^{2+}}$  为施主密度,  $N_{\text{Fe}^{3+}}$  为受主密度,  $N_{\text{Nb}^{4+}}$  俘获了电子的浅陷阱密度,  $N_{\text{Nb}^{5+}}$  为空的浅陷阱密度,  $s$  是光激发常数,  $I$  是光强,  $r$  为俘获概率,  $r'$  为从导带到受主的复合概率,  $r''$  为从陷阱到受主的复合几率.

在确定光强下, 对掺杂浓度一定的晶体, 载流子的俘获概率和复合概率为常数, 可写成:  $rN_{\text{Nb}^{5+}} = 1/t_1$ ,  $r'N_{\text{Fe}^{3+}} = 1/t_3$ , 各小极化子因与深能级距离不同, 复合时间不同, 但其平均复合时间为常数, 令  $r''N_{\text{Fe}^{3+}} = 1/t_4$ , 最后将热激发效率写成

$B = 1/t_2$ ;  $n \ll N_{\text{Fe}^{2+}}, N_{\text{Fe}^{3+}}$  看作不变. 由(5)–(7)式得:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2n}{dt^2} + \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} \right) \frac{dn}{dt} \\ & + \left( \frac{1}{t_1t_4} + \frac{1}{t_2t_3} + \frac{1}{t_3t_4} \right) n \\ & = sIN_{\text{Fe}^{2+}} \left( \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_4} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

令

$$\begin{aligned} r_{\pm} = \frac{1}{2} \left\{ - \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} \right) \right. \\ \left. \pm \left[ \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3} + \frac{1}{t_4} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. - 4 \left( \frac{1}{t_1t_4} + \frac{1}{t_2t_3} + \frac{1}{t_3t_4} \right) \right]^{1/2} \right\}, \end{aligned}$$

$$r_- = -\frac{1}{T_1},$$

$$r_+ = -\frac{1}{T_2},$$

$$\frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_4} = \frac{1}{T_3}.$$

(10) 式写成:

$$\frac{d^2n}{dt^2} + \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \frac{dn}{dt} + \frac{1}{T_1T_2}n = sIN_{\text{Fe}^{2+}} \frac{1}{T_3}. \quad (11)$$

当脉冲光通过时 ( $t \leq t_p$ ,  $t_p$  为脉冲持续时间 20 ns), 光脉冲可看作矩形脉冲, 方程(11)的通解为

$$n(t) = C_1 e^{-(t/T_1)} + C_2 e^{-(t/T_2)} + sIN_{\text{Fe}^{2+}} \frac{T_1T_2}{T_3}, \quad (12)$$

代入初始条件:  $n(t=0) = 0$ ,  $N_{\text{Nb}^{4+}}(t=0) = 0$ , 确定系数  $C_1$  和  $C_2$

$$\begin{aligned} n(t) = sI_0N_{\text{Fe}^{2+}} \frac{T_1T_2}{T_3} \left[ \frac{T_3 - T_1}{T_1 - T_2} e^{-(t/T_1)} \right. \\ \left. + \frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1} e^{-(t/T_2)} + 1 \right], \end{aligned} \quad (13)$$

当激光通过后 ( $t > T_p$ ), 导带电子以  $n(t = t_p)$ ,  $N_{\text{Nb}^{4+}}(t = T_p)$  为初值开始复合, 此时,  $I = 0$ , 导带电子衰减的形式为

$$n(t) = C'_1 e^{-(t/T_1)} + C'_2 e^{-(t/T_2)}, \quad (14)$$

代入初始条件, 确定系数  $C'_1$  和  $C'_2$

$$\begin{aligned} n(t) = sI_0N_{\text{Fe}^{2+}} \frac{T_1T_2}{T_1 - T_2} \left[ \frac{T_1 - T_3}{T_3} (1 - e^{-(T_p/T_1)}) \right. \\ \times e^{-((t-T_p)/T_1)} - \frac{T_2 - T_3}{T_3} (1 - e^{-(T_p/T_2)}) \\ \left. \times e^{-((t-T_p)/T_2)} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

需要注意的是,  $t_4$  是电子从小极化子复合到  $\text{Fe}^{3+}$  的平均寿命, 小极化子复合的形式为:  $N_{\text{Nb}^{4+}}(t)/N_{\text{Nb}^{4+}}(0) = \exp[-(t/\tau)^\beta]$  [11,12] (小极化子的复合实质为小极化子上的电子复合, 其中  $\beta$  反映这些), 反映这些小极化子的寿命偏离平均寿命的程度. 考虑电子的实际衰减与假设的偏差, 需对复合时间  $t_4$  进行修正,  $t_4 \rightarrow qt_4$ ,  $q$  是扩展因子  $\beta$  的函数 (如图 6 所示) [13], 实验测得  $\beta = (0.3-0.6)$ , 修正后  $T_1, T_2, T_3$  变为  $T'_1, T'_2, T'_3$ , 但导带光电子的衰减形式不变. 虽然导带电子以双指数函数衰减, 但第一个指数的寿命  $T'_1 < 10^{-9}$  s, 实验仪器 ( $\mu\text{s}$  级) 无法捕捉到, 对于本实验 ( $T_P \approx 20$  ns,  $T'_1 \leq 1$  ns,  $T'_2 \approx 10^{-5}$  s) 测得的是第一个指数衰减后的情况.

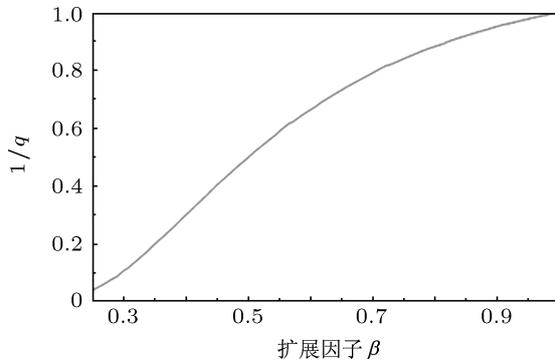


图 7 因子  $1/q$  与扩展因子  $\beta$  的关系

此时  $t \geq t_1, T'_2 \ll T'_1, T_P \ll T'_2$ :

$$n(t) \approx sI_0 N_{\text{Fe}^{2+}} T_P \frac{T'_1}{T'_3} \left(1 - \frac{T'_3}{T'_2}\right) e^{-((t-T_P)/T'_2)}, \quad (16)$$

$\sigma_1$  表示为

$$\sigma_1(t) = e\mu_1 n(t) \approx e\mu_1 sI_0 N_{\text{Fe}^{2+}} T_P \frac{T'_1}{T'_3} \left(1 - \frac{T'_3}{T'_2}\right) \times e^{-((t-T_P)/T'_2)}. \quad (17)$$

根据双中心模型, 当掺铁浓度一定时, 光电子从小极化子上直接复合,  $t_4$  同  $t_1, t_2, t_3$  一样为常数,  $\sigma_1^{\max} \propto I$ , 光电导随光强线性变化. 根据我们的电荷传输模型 (图 5), 小极化子上的光电子会跳跃迁移一段时间后复合. 光电子陷入  $\text{Nb}_L^{5+}$  中心或  $\text{Fe}^{3+}$  中心是局部的, 这样, 小极化子上的光电子寿命取决于到深陷阱中心 ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 的物理距离. 各小极化子的寿命一般不同, 因此得到的是小极化子的寿命谱, 而不是单指数弛豫过程, 且寿命谱越宽的扩展因子  $\beta$  越小. 电子由  $\text{Fe}^{2+}$  中心激发后最先陷入与源  $\text{Fe}^{2+}$  中心邻近的  $\text{Nb}_L^{5+}$  上, 在脉冲光持续时间内,

电子从小极化子激发后陷入其他的  $\text{Nb}_L^{5+}$  或  $\text{Fe}^{3+}$  上, 当脉冲光强度增大时, 电子会陷入更远的中心. 这样增加脉冲光强度会导致两个结果: 首先使得小极化子到深陷阱中心的平均距离变大, 其次使得晶体中小极化子分布得更均匀. 前者导致小极化子的平均寿命  $t_4$  增加, 后者使小极化子到深陷阱的实际距离偏离其平均距离的值变小了, 从而引起扩展因子增大 (更趋近于 1). 若光强继续增加, 小极化子分布得更均匀, 光强对小极化子分布的影响越小.  $t_4$  和随光强改变, 使得  $T'_1, T'_2, T'_3$  也随光强改变, 其中  $T'_3$  受光强影响最大. 由 (17) 式可知,  $\sigma_1^{\max}$  与光强  $I$  成非线性关系, 与实验结果相符合 (图 4(a)). 实验测得的导带光电子衰减时间  $\tau_1 \approx (64.5 \pm 0.2) \mu\text{s}$ , 几乎不受光强的影响, 而根据分析,  $\tau_1 = T'_2$ , 随光强改变. 在我们实验的光强范围内,  $\tau_1$  变化不大, 且测量和拟合时存在误差, 导致实验和理论结果出现偏差.

根据我们的电荷传输模型, 小极化子浓度的衰减形式为

$$N_{\text{Nb}^{4+}}(t) = N_{\text{Nb}^{4+}}(t = t_p) \exp[-(t/T)^\beta], \quad (18)$$

其中

$$\begin{aligned} N_{\text{Nb}^{4+}}(t = t_p) &= sI_0 N_{\text{Fe}^{2+}} t_2 \frac{T'_1 T'_2}{T'_3} \left[ \frac{T'_3 - T'_1}{-T'_2} e^{-(T_P/T'_1)} \left(\frac{1}{t'_1} + \frac{1}{t'_3} - 1\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{T'_3 - T'_2}{T'_2} e^{-(T'_P/T'_2)} \left(\frac{1}{t'_1} + \frac{1}{t'_3} + 1\right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{t'_1} + \frac{1}{t'_3} + 1\right) \right], \quad (19) \end{aligned}$$

$\sigma_2$  表示为

$$\sigma_2(t) = e\mu_2 N_{\text{Nb}^{4+}}(t). \quad (20)$$

根据 (19) 和 (20) 式,  $\sigma_2^{\max}$  与  $I$  呈非线性关系. 小极化子浓度的衰减快慢受  $t_1, t_2, t_3$  影响, 但主要由  $t_4$  和  $\beta$  决定, 因此随着光强的增强,  $T$  和  $\beta$  增大, 当光强增大到一定值时,  $T$  和  $\beta$  饱和. 该变化与实验结果  $\tau_2(I)$  和  $\beta(I)$  一致.

光电导衰减拟合参数随掺杂的变化也能用上述模型解释. 本实验所使用的所有样品,  $N_{\text{Fe}^{2+}}/N_{\text{Fe}^{3+}} \approx 0.2$ , 当  $N_{\text{Fe}}$  增大时,  $N_{\text{Fe}^{2+}}$  和  $N_{\text{Fe}^{3+}}$  均增大. 根据 (17) 和 (18) 式, 幅值  $\sigma_1^{\max}$  和  $\sigma_2^{\max}$  随  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度  $N_{\text{Fe}^{2+}}$  增加而增加, 由于时间参数受三价铁影响, 光电导幅值随掺铁浓度非线性增加. 光

电导衰减速度依赖于  $N_{\text{Fe}^{3+}}$ ,  $N_{\text{Fe}^{3+}}$  缩短了小极化子上的电子到深陷阱中的距离, 且实际距离偏离其平均距离的值变小, 使得光电导扩展指数部分的衰减平均时间缩短, 而扩展因子  $\beta$  增大, 但当入射光强太强时, 光电子分布已趋于均匀, 扩展因子就不再受掺杂和光强的影响.

我们的电荷传输模型能很好地解释光电导的衰减特性. 该模型可以看作双中心模型和电荷跳跃传输模型的结合, 更能反映掺铁 CLN 铌酸锂晶体的电荷传输机理.

## 5 结 论

实验研究了不同掺铁浓度 CLN 晶体在脉冲绿光下的瞬态光电导及其衰减过程. 实验结果表明: 光电导以指数和扩展指数叠加的形式衰减, 拟合参数随光强和掺铁浓度变化. 分析实验结果得出, 在高光强照射下, 掺铁 CLN 晶体中的电子同时在导带中和小极化子上迁移, 光电导还包括电子在小极化上迁移的贡献, 表示为

$$\sigma_{\text{ph}} = e\mu_1 n + e\mu_2 N_{\text{Nb}^{4+}}.$$

- 
- [1] Giinter P, Huignard J P 1988 *Topics Appl. Phys.* **61** 295
- [2] Wong K K 2002 *Properties of Lithium Niobate* (London: INSPEC) p113
- [3] Fu B, Zhang G Q, Liu X M, Shen Y, Xu Q J, Kong Y F, Chen S L, Xu J J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2946 (in Chinese) [付博, 张国权, 刘祥明, 申岩, 徐庆君, 孔勇发, 陈绍林, 许京军 2008 物理学报 **57** 2946]
- [4] Carnicer J, Caballer O, Carrascosa M, Cabrera J M 2004 *Appl. Phys. B Laser Opt.* **79** 351
- [5] Lüdtke F, Waasem N, Buse K, Sturman B 2011 *Appl. Phys. B* **105** 35
- [6] Jermann F, Otten J 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 2085
- [7] Zylbersztein A 1976 *Appl. Phys. Lett.* **29** 778
- [8] Josch W, Münser R, Ruppel W, Würfel P 1978 *Ferroelectrics* **21** 623
- [9] Carnicero J, Carrascosa M, García G, Agulló-López F 2005 *Phys. Rev. B* **72** 245108
- [10] Yang B, Yan X N, Lu C Y 2010 *Acta Photonic Sinica* **39** 214 (in Chinese) [杨冰, 阎晓娜, 路灿云 2010 光子学报 **39** 214]
- [11] Berben D, Buse K, Wevering S 2000 *Appl. Phys.* **87** 1034
- [12] Herth P, Schaniel D, Woike Th 2005 *Phys. Rev. B* **71** 125128
- [13] Sturman B, Carrascosa M, Agullo-Lopez F 2008 *Phys. Rev. B* **78** 245114

# Photo-conductivity decay properties of Fe-doped congruent lithium niobate crystals

Chen Xiao-Lan Zhang Yun<sup>†</sup> Ran Qi-Yi

(School of Physical Science and Technology, South West University, Chongqing 400715, China)

(Received 7 July 2012; revised manuscript received 26 August 2012)

## Abstract

Photo-conductivity transient processes of Fe:LiNbO<sub>3</sub> congruent crystals are investigated by electro-chemical analyzer. The experiments are executed with Fe:LiNbO<sub>3</sub> crystals of different Fe concentrations in the conditions of different laser intensities. The results show that the transient photo-conductivity of the Fe-doped lithium niobate crystal is formed through a complex process of electron transport; the decay of photo-conductivity can be fitted to an exponential function and a stretched-exponential function. The dependences of the fitting parameters on laser intensity and iron-doped concentration are measured. The values of amplitudes  $\sigma_1^{\max}$ ,  $\sigma_2^{\max}$ , time constant  $\tau_2$  and stretching factor  $\beta$  increase strongly at low intensities, and  $\tau_2$  and  $\beta$  reach their saturation value for higher intensities; with the increase of the concentration of Fe ions, the values of  $\sigma_1^{\max}$ ,  $\sigma_2^{\max}$  and  $\tau_2$  increase, but  $\beta$  decreases. With experimental results, we propose a charge transfer model which includes the migration of electrons in the conduction band and the jumping of electrons between small-polarons. The model better explains the main features of photo-conductivity decay for Fe-doped congruent lithium niobate crystals.

**Keywords:** lithium niobate, photo-conductivity, decay, charge transport

**PACS:** 72.20.Jv, 42.70.Nq

**DOI:** 10.7498/aps.62.037201

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yzhang@swu.edu.cn