

# 带导模型对 BaTiO<sub>3</sub> 晶体双光束耦合 温度特性的理论分析

刘劲松 安毓英

(西安电子科技大学技术物理系, 西安, 710071)

**摘要:** 用单载流子一能级带导模型对 BaTiO<sub>3</sub> 晶体在 830μm 处双光束耦合的指数增益系数和响应时间温度特性的实验结果做了理论分析。在考虑了量子效率的温度特征后, 理论能半定量地解释实验现象。

**关键词:** 光折变非线性光学 双光束耦合 温度特性 量子效率 钛酸钡晶体

## Theoretical research of band-conduction model on the temperature dependence of two-beam coupling in BaTiO<sub>3</sub> crystal

*Liu Jinsong, An Yuying*

(Department of Technical Physics, Xidian University)

**Abstract:** The experiment results of the temperature dependence of the gain coefficient and response time in two-beam coupling in BaTiO<sub>3</sub> crystal at 830nm are analyzed theoretically by using the one-carrier and one-level band-conduction model. The experimental phenomena could be explained semiquantitatively by using the theory after the temperature dependence of quantum efficiency is considered.

**Key words:** photorefractive nonlinear optics two-beam coupling temperature characteristic quantum efficiency BaTiO<sub>3</sub> crystal

### 一、引言

Cheng Lijen 等<sup>1</sup>对 Cr : GaAs 双光束耦合的温度特性做了实验研究并用 Kukhtarev<sup>2</sup> 的单载流子一能级模型给出了仅适用于解释其自身实验的理论公式。理论能半定量地解释实验结果。他们还指出, 对氧化物光折变晶体来说, 由于禁带宽度太宽, 用通常的方法难以观测出光折变效应的温度特性。我们曾用同样的模型给出了双光束耦合温度特性的一般理论公式, 解释了我们 Ce : LiNbO<sub>3</sub> 晶体双光束耦合与光致散射效应的温度特性的实验研究结果, 理论同样能半定量地反映实验<sup>3,4</sup>。我们的结果说明, 由于杂质能级的存在, 使得热激发足以将电子激

发到导带,从而用通常的方法就可以实验观测到 Ce:LiNbO<sub>3</sub> 这种氧化物光折变晶体的温度特性。本文仍用这组理论公式来分析另一种氧化物光折变晶体——BaTiO<sub>3</sub> 的双光束耦合的温度特性。P. H. Beckwith 等<sup>[5]</sup>实验研究了 BaTiO<sub>3</sub> 的双光束耦合的温度特性,但一直未做相应的理论分析。我们的分析表明,理论能半定量地反映实验结果,从而进一步说明杂质或缺陷能级的存在,使得用普通的方法就足以观测到氧化物晶体光折变效应的温度特性。

## 二、基本公式

由 Kukhtarev 的单载流子—能级带导模型可得到双光束耦合的指数增益系数  $\Gamma$  的表达式为<sup>[1-4]</sup>

$$\Gamma = 2\delta \frac{E_T E_Q}{(E_T + E_Q)(1 + \sigma_d/\sigma_p)} \quad (1)$$

$$\sigma_d = \sigma_0 T^{3/2} \exp(-E_i/k_B T) \quad (2)$$

$$\sigma_p = SI \quad (3)$$

$$E_T = 4\pi k_B T \sin\theta / (\lambda \epsilon) \quad (4)$$

$$E_Q = e\lambda N_A / (4\pi \epsilon \epsilon_0 \sin\theta) \quad (5)$$

$$\delta = \pi r_{\text{eff}} / (\lambda n_e) \quad (6)$$

$$r_{\text{eff}} = (n_o^4 r_{13} \cos\theta_1 \cos\theta_2 + 2n_e^2 n_o^2 r_{42} \cos^2\theta_3 + n_e^4 r_{33} \sin\theta_1 \sin\theta_2) \sin\theta_3 \quad (7)$$

式中,  $\sigma_d$  为暗电导,  $\sigma_p$  为光电导,  $E_i$  为杂质或缺陷能级在带隙中的位置,  $\sigma_0$  为材料决定的常数,  $S$  为光电离截面,  $I$  为总光强,  $k_B$  为 Boltzman 常数,  $T$  为绝对温度,  $N_A$  是陷阱密度,  $e$  为基本

电荷电量,  $\lambda$  是光波波长,  $2\theta$  是泵浦光与信号光的夹角,  $\epsilon_0$  与  $\epsilon$  分别是真空与相对介电常数,  $n_o$  与  $n_e$  分别为晶体对 o 光和 e 光的折射率,  $r_{13}, r_{33}, r_{42}$  是电光系数,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的含义如图 1 所示。图 1 中,  $I_{10}$  为泵浦光,  $I_{20}$  为信号光,  $I = I_{10} + I_{20}$ ,  $\hat{C}$  为晶体 C 轴方向,  $\hat{k}$  为光栅波矢方向。由以上各式即可描述  $\Gamma$  随  $T$  的变化特性。

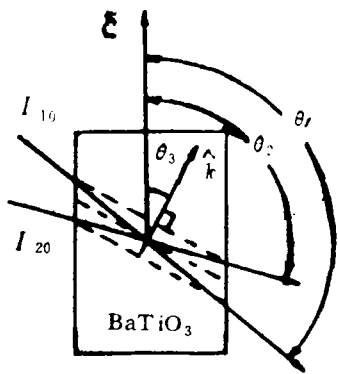


Fig. 1 Geometry of the two-beam coupling process in BaTiO<sub>3</sub>

图 2 中的圆点是文献[5]中关于 BaTiO<sub>3</sub> 的实验点,根据实验条件以及 BaTiO<sub>3</sub> 的有关参数<sup>[6]</sup>,取  $\theta_1 = 117^\circ$ ,  $\theta_2 = 123^\circ$ ,  $\theta_3 = 31^\circ$ ,  $\theta = 3^\circ$ ,  $r_{13} = 24 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ,  $r_{33} = 80 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ,  $r_{42} = 1640 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ,  $N_A = 10^{23} \text{m}^{-3}$ ,  $\epsilon = 3600$ ,  $I = 6800 \text{W/m}^2$ 。在  $\lambda = 830 \times 10^{-9} \text{m}$  处,  $n_e = 2.18$ ,  $n_o = 2.44$ 。令  $A = \sigma_0/s$ , 则  $E_i$  和  $A$  需由实验值确定。从(1)~(7)式中解出  $E_i$  和  $A$ , 将图 2 中的实验值代入, 得到  $A$  和  $E_i$  的量级为  $10^7 \text{m}^2(\text{JS})^{-1}$  和  $10^{-19} \text{J}$ 。

一方面考虑到上述各参量如  $n_e, r_{42}$  等的数值不会与实验所用 BaTiO<sub>3</sub> 的相应值完全一致, 另一方面为了便于理论与实验相比较, 我们在(1)式中引入一个修正常数  $B$ , 使

$$\Gamma = 2B\delta \frac{E_T E_Q}{(E_T + E_Q)(1 + \sigma_d/\sigma_p)} \quad (8)$$

## 三、分析与讨论

### 1. 增益系数 $\Gamma$

取  $A=2 \times 10^7 \text{m}^2(\text{SJ})^{-1}$ ,  $E_i=1.07 \times 10^{-19} \text{J}$ ,  $B=1.275$ , 其余各量不变, 由(2)~(8)式得到  $\Gamma$  随  $T$  变化的理论曲线如图 2 中实线所示。所得结果表明理论不仅能很好地反映实验点的变化趋势, 同时由于  $|B-1|=0.275$ , 因此理论与实验值的相对误差为 30% 左右。所以, 理论能半定量

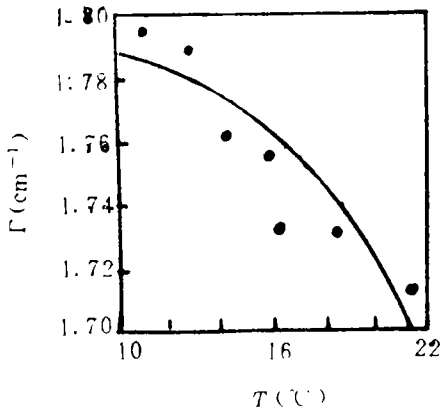


Fig. 2 Measured  $\Gamma$ - $T$  points and its theoretical curve

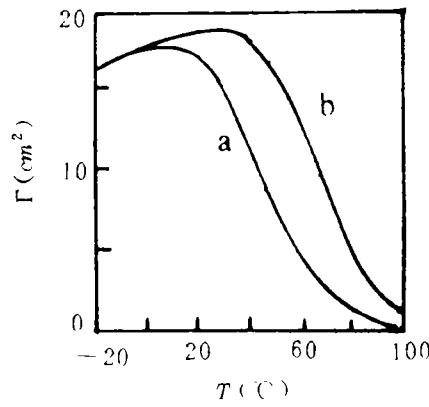


Fig. 3 Theoretical curves of  $\Gamma$  versus  $T$

地反映实验结果。 $E_i$  的大小  $1.07 \times 10^{-19}$  (相当于  $0.67 \text{eV}$ ) 和文献[7]中关于  $\text{BaTiO}_3$  的测量值  $0.7 \text{eV}$  基本相同, 和  $\text{Cr:GaAs}$ <sup>[1]</sup> 以及  $\text{Ce:LiNbO}_3$ <sup>[2]</sup> 的  $E_i$  的量级相同。

在图 3 中, 曲线 a 为在以上各参数下  $T$  从  $-20^\circ\text{C}$  到  $100^\circ\text{C}$  的  $\Gamma$  随  $T$  变化的理论曲线。可见,  $\Gamma$  的峰值在  $5^\circ\text{C}$  附近。但  $\text{BaTiO}_3$  通常只能工作在  $10^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  之间, 否则要变为多畴晶体。如能改变晶体的一些参数, 使得  $\Gamma$  的峰值在室温附近, 即无疑有益于  $\text{BaTiO}_3$  的应用。决定  $\Gamma$ - $T$  曲线峰值位置的关键参数是  $E_i$ , 取  $E_i$  为  $1.15 \times 10^{-19} \text{J}$ , 其余各量不变, 则如图 3 曲线 b 所示,  $\Gamma$ - $T$  曲线峰值的位置即可处于室温范围。通过掺杂等手段可望改变  $E_i$ , 从而达到上述目的, 这一点希望能引起材料工作者的注意。

2. 响应时间  $\tau$

P. H. Beckwith 等还测量了  $\text{BaTiO}_3$  双光束耦合响应时间  $\tau$  的温度特性。 $\tau$  定义为从过程开始到  $\Gamma$  达到其最大值的  $(1-e^{-1})^2$  倍所需要的时间。测量结果为  $\tau$  从  $T=11^\circ\text{C}$  时的 100s 近乎线性地变为  $T=22^\circ\text{C}$  时的 50s, 如图 4 曲线 a 所示。

$\tau$  可从理论上表示为<sup>[8]</sup>:

$$\tau = \frac{2h\nu\lambda\epsilon\epsilon_0}{\pi e\Delta n_c^3 r_{\text{eff}} I \eta} \Gamma \quad (9)$$

式中,  $h\nu$  为光子能量,  $\alpha$  为吸收系数,  $\eta$  为量子效率。如果视(9)式中除  $\Gamma$  外其余各量均不随  $T$  而变, 则  $\tau$  和  $\Gamma$  随  $T$  变的曲线之间只差一个常数。由文献[5]中提供的参数,  $h\nu=2.4 \times 10^{-19} \text{J}$ ,  $\alpha=8 \text{m}^{-1}$ , 再考虑到  $T=11^\circ\text{C}$  时  $\tau=100\text{s}$ , 从而取  $\eta=3.62 \times 10^{-5}$ , 其余各量不变, 由(2)~(9)式得  $\tau$  随  $T$  变化的理论曲线如图 4 曲线 b 所示, 同实验曲线 a 相差甚远。这种差别不应来自  $\Gamma$  随  $T$  的理论关系, 因为它已基本得到实验验证。考察(9)式, 除  $\Gamma$  外, 能随  $T$  变化的量还有  $\epsilon$ ,  $\alpha$ ,  $n_c$ ,  $r_{\text{eff}}$  和

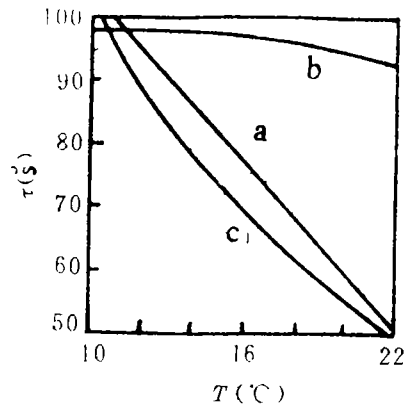


Fig. 4 Measured  $\tau$ - $T$  curve and its theoretical curves

$\eta$ 。这其中  $\epsilon, \alpha, n_e, r_{eff}$  都是  $T$  的极缓变函数, 在 10°C 到 20°C 内, 其变化完全可以忽略。 $\eta$  是人们为了描述光子同介质中的原子或分子系统相互作用的概率而引入的物理量, 它应该和光子的波长、密度、偏振以及介质的结构和状态等有关。温度  $T$  是介质的状态量,  $\eta$  显然应该同  $T$  有关。所以, 没考虑  $\eta$  的温度特性应该是造成上述差别的重要原因。

根据以上分析, 我们有理由从 (9) 式中解出  $\eta$ , 利用  $\Gamma$  和  $\tau$  的实验值, 最后可给出  $\eta$  的一个经验公式为

$$\eta = [0.27(T - 273) + 0.92]10^{-5} \quad T \in (283, 295)K \quad (10)$$

由 (2)~(10) 式, 计算出  $\tau$  在考虑了  $\eta$  温度特性后的理论关系如图 4 曲线 c 所示, 与实验曲线 a 基本吻合。所以, 在考虑了量子效率的温度特性后, 带导模型理论也同样能半定量地解释双光束耦合响应时间的温度特性。

## 四、结 论

1. 用单载流子一能级带导模型可以半定量地解释 BaTiO<sub>3</sub> 晶体双光束耦合的温度特性。
2. 杂质或缺陷能级的热激发速率随温度变化是人们得以观察到 BaTiO<sub>3</sub> 双光束耦合温度特性的重要原因之一。
3. 适当选取 BaTiO<sub>3</sub> 中杂质或缺陷的能级在带隙中的位置, 可望使得室温下 BaTiO<sub>3</sub> 双光束耦合的增益系数得以增加。
4. 在用带导模型理论分析 BaTiO<sub>3</sub> 双光束耦合响应时间的温度特性时, 必须考虑量子效率的温度特征, 否则将造成理论与实验的显著差别。本文给出了 BaTiO<sub>3</sub> 量子效率在 10°C 到 20°C 时随温度变化的经验公式。从理论上给出它的一般表达式无疑是件有意义的工作, 希望能引起有关读者的注意。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng L, Partovi A. A P L. 1986; 49: 1456
- 2 刘劲松, 李铭华, 石顺祥 *et al*
- 3 刘劲松, 李铭华, 石顺祥 *et al*. 光学学报, 1991; 11: 694
- 4 Kukhtarev N V, Markov V B, Odulov S *et al*. Ferroelectrics. 1979; 22: 949
- 5 Beckwith P H, Christian W R. Opt Lett., 1989; 14: 642
- 6 Valley G C. J O S A(B). 1987; 4: 14
- 7 Townsend R L, Lamacchia J T. J A P, 1970; 41: 5188
- 8 Pochi Yeh. IEEE J Q E, 1989; QE-25: 484

\* \* \*

作者简介: 刘劲松, 男, 1959 年 11 月生, 工学博士, 副教授。现从事光折变非线性光学与光电对抗的实验与理论研究。主持和参加过霍英东高校青年教师基金和国家自然科学基金资助的课题等多项题目。

收稿日期: 1993-04-12      收到修改稿日期: 1993-10-09