

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0267-03

两中心模型中光折变晶体两波耦合增益系数的温度特性*

吉选芒¹ 王金来¹ 刘劲松² 安毓英³

¹山西运城高等专科学校物理系, 运城 044000
²华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074
³西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071

摘要 对两中心模型光折变晶体两波耦合增益系数 Γ , 总的有效陷阱密度 N_{eff} 和强度特性因子 $\eta(I)$ 的温度特性进行了理论研究。结果显示在两中心模型中, Γ 、 N_{eff} 和 $\eta(I)$ 有着复杂的温度特性, 浅能级的密度决定着它对温度特性的贡献。

关键词 光折变晶体, 两波耦合, 温度特性

中图分类号 O734 **文献标识码** A

Temperature Dependence of Two-Wave Coupling Gain Coefficient in Two-Centre Photorefractive Crystals

JI Xuan-mang¹ WAN Jin-lai¹ LIU Jin-song² AN Yu-ying³

¹ Department of Physics, Yuncheng Advanced Training College, Yuncheng 044000
² State Key Laboratory of Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074
³ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Abstract Temperature dependence of two-beam coupling gain coefficient Γ , the effective trap density N_{eff} and intensity dependent factor $\eta(I)$ are studied theoretically for the two-centre photorefractive crystals. The results show that N_{eff} , $\eta(I)$ and Γ has more complicated temperature dependence behaviors in two-centre crystals, which are related to the density of shallow level.

Key words photorefractive crystal, two-wave coupling, temperature dependence

1 引言

光折变效应自发现以来,受到许多研究者的关注和注意。已被广泛应用于光图像处理、数据存储等领域^[1]。光折变晶体通常对温度有着很强的依赖特性,Rytz^[2]等研究了 BaTiO₃ 晶体的温度特性,结果显示两波耦合增益系数随温度增加而减小。这主要是由于晶体的电光系数和有效电荷密度都是随着温度升高而减小。以上是单能级带运输模型的结论。然而,有些晶体材料存在着双光折变中心,这就是人们提出的两中心模型^[3]。在这个模型中有两个

杂质能级,一个深能级和一个浅能级,在带隙中引起不同的掺杂中心。本文中,我们系统地研究两中心模型晶体两波耦合增益系数 Γ 的温度特性。

2 两中心模型中增益系数 Γ 的定义

两中心模型能级结构见文献[4]的图1。在这个模型中,对于空穴占主导地位的光折变晶体如 BaTiO₃^[5],两波耦合增益系数 Γ 定义为

$$\Gamma = \frac{2\pi n^3 K_B T r_{\text{eff}}}{\cos\theta_i e \lambda} \left(\frac{K_g}{1 + K_g^2/K_0^2} \right) \eta(I) (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \quad (1)$$

式中, n 是折射率, θ_i 是两束入射光在晶体内部夹角的一半, K_B 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, λ 是光

* 山西省教育厅科技开发项目资助课题。

在真空中的波长, e 是电荷的电量, $K_g = 4\pi\sin\theta_i/\lambda$ 是光栅波矢, K_0 是德拜散射波矢, $\eta(I)$ 是光强度特性因子, e_1 和 e_2 是两光束偏振方向单位矢量。

在(1)式中 K_0 定义如下^[5]

$$K_0^2 = \frac{e^2}{\epsilon K_B T} N_{\text{eff}} \quad (2)$$

$$N_{\text{eff}} = N_E + M_E =$$

$$\frac{(N_0 - N_F - N_0)}{N_D} + \frac{M_B(M_T - M_0)}{M_T} \quad (3)$$

式中, N_E 和 M_E 分别是深能级和浅能级有效陷阱密度的强度特性因子, ϵ 是有效绝对介电常数, N_D 是总深陷阱密度, N_0 ($\approx M_0$) 是通过光照从深陷阱转向浅陷阱的空穴密度, 定义如下:

$$N_0 \approx M_0 = \frac{1}{2[\rho(I) - 1]} \rho(I) (N_{DF} + M_T) + N_F - \{[\rho(I)(N_{DF} + M_T) + N_F]^2 - 4\rho(I)[\rho(I) - 1]N_{DF}M_T\}^{1/2} \quad (4)$$

$$\rho(I) = \frac{S_D I}{S_D I + \beta \gamma_D}, \quad N_{DF} = N_D - N_F \quad (5)$$

在(5)式中 S_D 和 S_T 中分别是空穴在深陷阱和浅陷阱的光电离截面, β 是浅陷阱的热激发率, γ_D 和 γ_T 分别是空穴到深陷阱和浅陷阱的复合率。

光强度特性因子 $\eta(I)$ 定义如下:

$$\eta(I) = \frac{1}{N_E + M_E} \left(N_E + \frac{M_E}{1 + \beta/S_T I} \right) \quad (6)$$

影响总有效电荷密度温度特性有两个主要因素, 其一是 N_F 随温度增加而增大, 在空穴占支配地位的晶体如 BaTiO_3 , 深能级在费米能级以上。因此, 在暗光区, 不参与竞争陷阱密度 N_F , 与温度的关系也服从著名的费米-狄拉克函数:

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/K_B T] + 1} \quad (7)$$

其中 E 是深能级大小, E_F 是费米能级大小。

影响温度特性第二个因素是浅能级的热激发速率 β 随温度增加而增大。 β 的增加导致 N_{eff} 减小, 同时对 $\eta(I)$ 也产生影响。 β 随温度变化关系为:

$$\beta = \beta_0 \exp\left(-\frac{E_A}{K_B T}\right) \quad (8)$$

其中 β_0 为常数, E_A 是浅能级热动能大小。分析计算中取 $E_A = 0.7 \text{ eV}$ 。

3 理论分析和讨论

利用上述理论, 我们对 Γ 的温度特性进行了理论分析, 同时也分析了 $\eta(I)$ 和 N_{eff} 随温度的变化关系。 N_{eff} 温度特性在文献[4]中已有报道, $\eta(I)$ 和 Γ 温度特性是本文报道的。

图 1 给出了利用(1), (3), (6)式计算的在 $M_T = 100 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时, Γ , N_{eff} 和 $\eta(I)$ 随温度 T 变化

关系曲线。图 1(a)是 N_{eff} 的温度特性, 从中可以看到, 在不同光强下, N_{eff} 随 T 变化规律趋势一致。在这种情况下, 浅能级对光折变效应贡献是主要的。 N_{eff} 主要靠 N_0 来确定, 因而随着温度升高, N_{eff} 总是减小的。图 1(b)是 $\eta(I)$ 的温度特性曲线, 可以看到, 当光强大时, $\eta(I)$ 随温度升高而减小, 而光强小时, $\eta(I)$ 随温度升高而增大。图 1(c)是 Γ 随 T 在不同光强下的变化规律, 可以看出, 当光强大时, Γ 随 T 增加而减少, 这是由于 $\eta(I)$ 和 N_{eff} 都随 T 的增加而减少。浅能级在这种情况下起决定性作用。

图 2 给出了(1), (3), (6)式计算的在 $M_T = 0.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 情况下 Γ , N_{eff} 和 $\eta(I)$ 随 T 变化曲线。由图 2(a)可以看到, 在不同光强下 N_{eff} 随 T 变化趋势相一致, N_{eff} 随 T 在整个温度变化范围内总是增加的。这意味着当浅能级密度 M_T 小时, 浅能级对的贡献是小的。在大光强下浅能级的贡献甚至饱和。在这种情况下, N_F 的增加决定着 N_{eff} 的温度特性。图 2(b)是 $\eta(I)$ 的温度特性, 可以看出, 在不同光强下, $\eta(I)$ 随 T 变化趋势相近, 随着 T 增加, $\eta(I)$ 先减后增, 有一极小值存在, 但不同光强下, 极小值出现的位置不同。图 2(c)是 Γ 的温度特性, 可以看出, 随着 T 的增加, Γ 单调增加, 这是由于 M_T 较小时, 浅能级对 N_{eff} 贡献对 Γ 的影响不大。 Γ 的温度特性主要取决于 N_F 的支配。

计算中参数选取如下: $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_F = 0.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\gamma_D/\gamma_T = 2$, $S_D = 5 \text{ cm}^2/\text{J}$, $S_T = 20 \text{ cm}^2/\text{J}$, $\beta = 10 \text{ Hz}$, $n = 2.30$, $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $r_{\text{eff}} = 80 \text{ Pm/V}$, $\lambda = 514.5 \text{ nm}$, $\theta_i = 15^\circ$

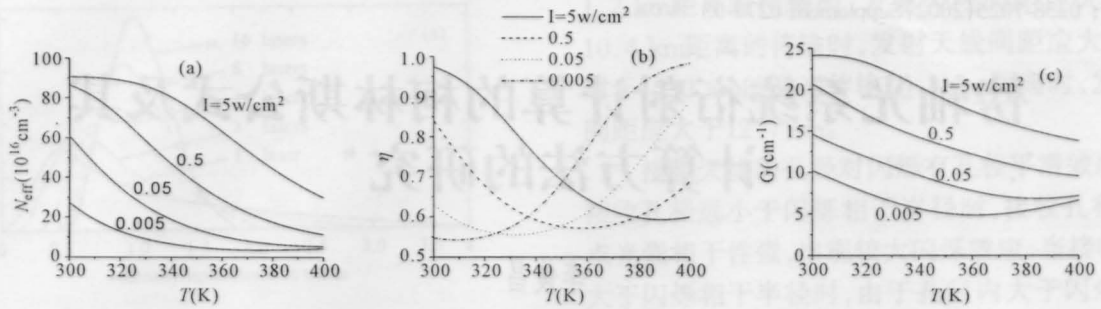


图1 两中心模型中 N_{eff} , $\eta(I)$ 和 Γ 在不同光强下随温度 T 的变化关系.

(a) $N_{\text{eff}} \sim T$; (b) $\eta(I) \sim T$; (c) $\Gamma \sim T, M_T = 100 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Fig. 1 The calculated total effect trap density N_{eff} , intensity dependent factor $\eta(I)$ and gain coefficient Γ as a function of temperature at different writing intensities in a two-centre crystal

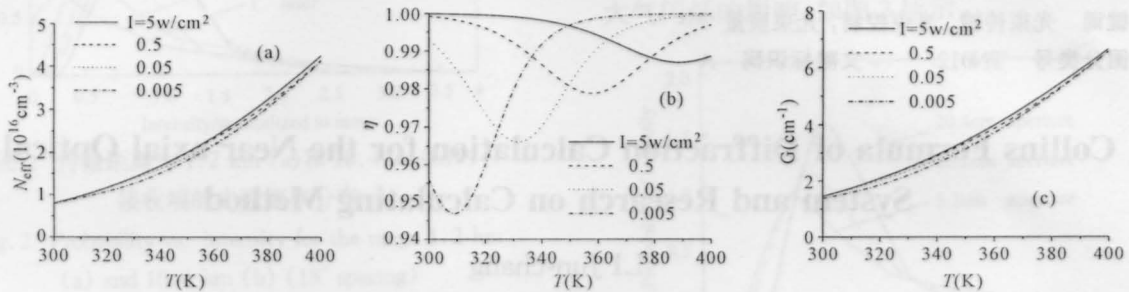


图2 两中心模型中 N_{eff} , $\eta(I)$ 和 Γ 在不同光强下随温度 T 的变化关系.

(a) $N_{\text{eff}} \sim T$; (b) $\eta(I) \sim T$; (c) $\Gamma \sim T, M_T = 0.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Fig. 2 The calculated N_{eff} , $\eta(I)$ and Γ as a function of temperature at different writing intensities in a two-centre crystal

折变晶体的内部结构是十分有用的。

4 结 论

在两中心模型中,存在着一个深能级和一个浅能级,这两个能级在带隙之间引导不同的掺杂中心。浅能级的密度 M_T 决定着晶体的温度特性。影响温度特性主要因素是总有效电荷密度 N_{eff} 和强度特性因子 $\eta(I)$ 随温度的变化关系。当 $M_T = 0.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 较小时,在 300~400 K 的范围内, N_{eff} 和 Γ 随温度的增加而单调增加,而 $\eta(I)$ 在不同的光强下温度特性差别较大。当 $M_T = 100 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 较大时,在上述的温度范围内, N_{eff} 和 Γ 随温度增加而单调下降,而 $\eta(I)$ 的温度特性表现为当总光强较大时, $\eta(I)$ 随温度增加而减小。而当总光强很小时, $\eta(I)$ 随温度的增加而变大,浅能级密度 M_T 的不同是引起 Γ 温度特性不同的主要因素,这些结果对认识光

参 考 文 献

- 1 N. V. Rukhtarev, V. B. Markov, S. G. Ldulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals. *Ferroelectrics*, 1979, **22**:949~956
- 2 D. Rytz, M. B. Klein, R. A. Mullen *et al.*. High efficiency fast response in photorefractive BaTiO_3 at 120 °C. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(21):1759~1761
- 3 G. A. Brost, R. A. Motes, J. R. Rotge. Intensity dependent absorption and photorefractive effects in barium titanate. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, (9):1879~1885
- 4 C. Mingjun, S. X. Dou, Y. Peixian. Theoretical study of the temperature dependence of total effective trap density in two-centre and three-charge-state photorefractive crystals. *Opt. Commun.*, 1999, **165**(15):261~266
- 5 P. Tayebati, D. Mahgerfteh. Theory of the photorefractive effect for $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and BaTiO_3 with shallow traps. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, (8):1053~1064