

光折变晶体两波耦合增益系数强度特性理论研究

吉选芒¹, 安毓英², 刘劲松²

(1. 山西运城高等专科学校物理系, 山西 运城 044000;

2. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 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 $\eta(I)$ 的强度特性进行了理论研究。结果显示在两中心模型的光折变晶体中, Γ , N_{eff} 和 $\eta(I)$ 有着复杂的特性。当 $S_D \gamma_T / S_T \gamma_D$ 小时, 对于 A 类和 B 类两中心晶体, N_{eff} 随强度的增加而增加最终趋于饱和, 当 $S_D \gamma_T / S_T \gamma_D$ 大时, 对于 A 类晶体 N_{eff} 增加到一个最大值后稍有减少, 而对于 B 类晶体, N_{eff} 增加到最大值后然而有较大的减少。不同类型晶体增益系数 Γ 有着不同的强度特性是由于晶体中有着不同的能级结构。

关键词:光折变晶体; 两波耦合; 增益系数; 强度特性。

中图分类号: O437 文献标识码: A

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。最早的光折变效应模型^[1-2]是单能带运输模型, 他们认为光折变晶体的总的有效电荷密度与写入光栅的光强度是无关的, 同时认为光导率和响应率是强度的线性函数。然而, 对于许多晶体, 随着光强的增加, N_{eff} 增加而最终趋于饱和^[3]。另外, 光导率随光强度变化的非线性特性也被观察到^[4]。同时, 热激发对光折变效应的影响也不容忽视^[5]。为了说明这些现象, 人们提出了两中心模型并将它有所发展^[3-4]。在这个模型中有两个杂质能级, 一个深能级和一个浅能级, 在带隙之间引起不同的掺杂中心。两中心模型能够成功地解释一些光折变现象, 如光诱导吸收, 空间电荷场和有效电荷密度的强度特性以及光导率的非线性强度特性。本文系统地研究了在两中心模型晶体的有效增益系数 Γ 的强度特性, 在两个中心模型中, 增益系数 Γ 的强度特性较为复杂。

2 两中心模型中有效增益系数 Γ 的定义

两中心模型的能级结构如图 1 所示。

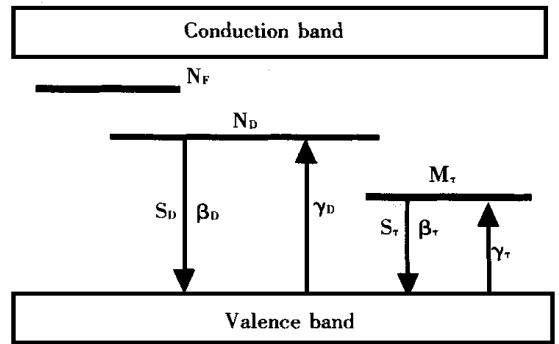


Fig. 1 Energy band diagrams of the two-center model. Here s , β , γ represent ionization cross section, thermal ionization rate and recombination rate, respectively.

在两中心模型中, 对于空穴占主导地位的光折变晶体如 BaTiO_3 ^[6], 两波耦合增益系数 Γ 定义为

$$\Gamma = \frac{2\pi n^3}{\cos\theta} \cdot \frac{K_B T}{e} \cdot \frac{r_{eff}}{\lambda} \cdot \left(\frac{k_g}{1 + k_g^2/k_0^2} \right) \eta(I) (\hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2) \quad (1)$$

其中 n 是折射率, θ 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, r_{eff} 是有效电光系数, λ 是光在真空中的波长, e 是电荷的电量, $K_g = 4\pi n \sin\theta / \lambda$ 是光栅波矢, K_0 是德拜散射波矢, $\eta(I)$ 是强度特性因子, \hat{e}_1 和 \hat{e}_2 是两光束偏振方向的单位矢量。

在(1)式中 K_0^2 被定义如下^[6-7]:

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

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

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

其中 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 是有效的绝对介电常数, N_D 是总的深陷阱密度, N_F 是不参与竞争的深陷阱密度, M_T 是总的浅陷阱密度。 N_0 (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:

$$N_0 = M_0 =$$

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

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

在方程(5)中 S_D 和 S_T 分别是空穴从深陷阱和浅陷阱的光电离截面, β 是以浅陷阱的热激发率, Y_D 和 Y_T 分别是空穴到深陷阱和浅陷阱的复合率。

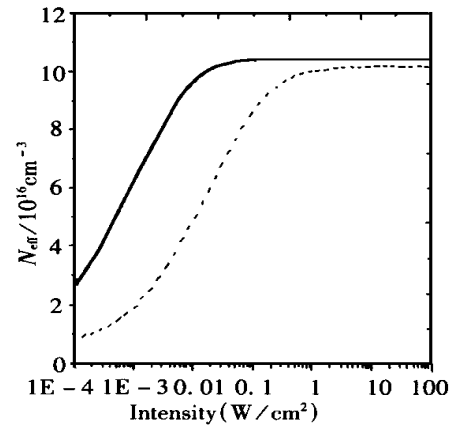
强度特性因子 $\eta(I)$ 被定义如下:

$$\eta(I) = \frac{1}{N_g + N_g} (N_E + \frac{M_g}{1 + \beta/S_T I}) \quad (6)$$

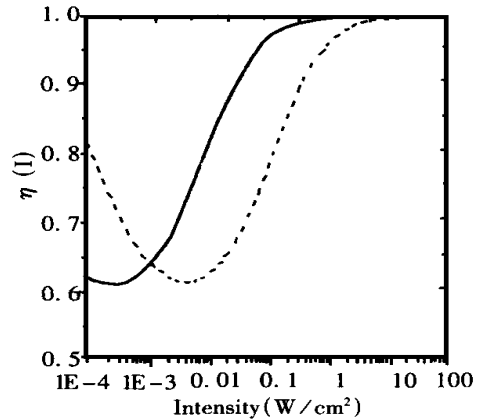
3 理论分析和讨论

Feinberg^[8] 等定义了两种类型的光折变晶体: A 类和 B 类。在 A 类晶体中总的深陷阱密度 N_D 远大于总的陷阱的浅陷阱密度 M_T 。因此, A 类晶体擦除速度几乎随强度增加而线性增加, 而且由于浅陷阱效应弱因而暗导率很小。对于 B 类晶体, 总的深陷阱密度 N_D 等于或略小于总的浅陷阱密度 M_T (即 $M_T \sim N_D$), 据此, B 类晶体擦除速度增加小于光强的线性增加, 而且由于浅能级的影响足够大, 因而有一个大的暗导率。

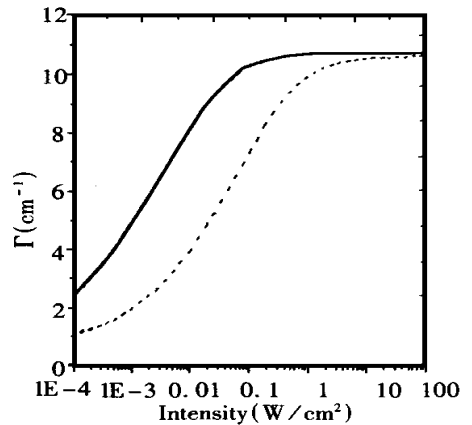
在公式(1)中, 影响 Γ 的强度特性实际有两项, 一项是有效电荷密度 N_{eff} 的强度特性, 一项是强度特性因子 $\eta(I)$ 的强度特性。关于 N_{eff} 的强度特性, Chiming-Jun^[9] 已作了报道, 本文将直接给出结果。关于 $\eta(I)$ 的强度特性, 本文将首次给出研究结果, 将二者综合, 给出 Γ 的强度特性。



(a)



(b)

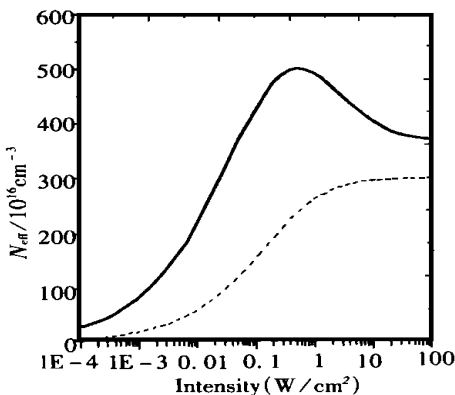


(c)

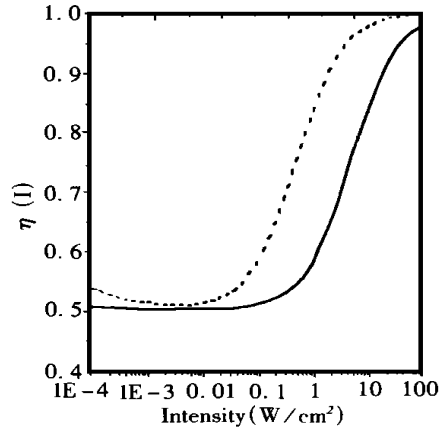
Fig. 2 Calculated total effective trap density N_{eff} , intensity dependent factor $\eta(I)$ and gain coefficient Γ as a function of intensity I in a type-A two-centre crystal, (a) $N_{eff} \sim I$, (b) $\eta(I) \sim I$, (c) $\Gamma \sim I$. The parameters used are $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_F = 0.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\beta = 10 \text{ Hz}$, $M_T = 10 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, solid lines: $Y_D/Y_T = 1$, $S_D = 20 \text{ cm}^2/\text{J}$, $S_T = 2 \text{ cm}^3/\text{J}$, dash lines: $Y_D/Y_T = 2$, $S_D = 20 \text{ cm}^2/\text{J}$, $S_T = 2 \text{ cm}^3/\text{J}$

对于 A 类晶体,图 2 中的 a 图给出的是文献^[9]对 N_{eff} 强度特性的研究结果。由图可见,当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是小的时候, N_{eff} 随强度的增加而增加且最终趋于饱和,如图中虚线所示。当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是大的时候,如图 2 的 a 中实线所示, N_{eff} 随强度的增加先达到一个最大值,然后稍有减少。图 2 的 b 图给出的是 A 类的强度特性因子 $\eta(I)$ 随强度 I 的变化关系。由图可见,当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是小的时候,如图 2 的 b 中虚线所示, $\eta(I)$ 随 I 的增加而减小达到一个最小值而后增加最终趋于饱和。而当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是大的时,如图 2 的 b 中实线所示, $\eta(I)$ 变化趋势和虚线趋势一致,但所对应最小值时的总光强 I 要比虚线的强度 I 小。图 2 的 c 给出了 A 类晶体 Γ 的强度特性。图中实线对应 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 大的情况,虚线代表 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 小的情况,两种情况变化趋势一致。但同一强度下,实线对应的 Γ 值要比虚线的 Γ 值大。

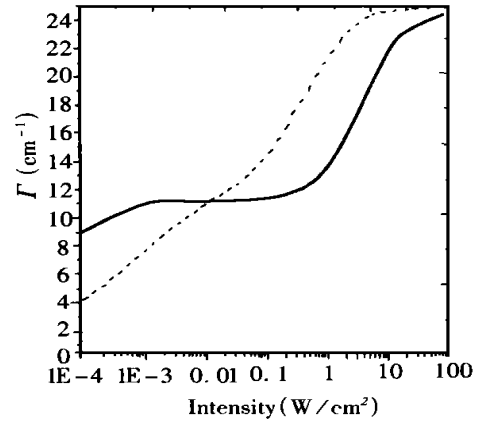
图 3 给出了 B 类晶体强度特性的理论曲线。图 3 中的 a 图是 B 类晶体 N_{eff} 的强度特性曲线。由图可见,当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是小值时, N_{eff} 有和 A 类晶体相似的行为,如图中虚线所示。当 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 是大的时, N_{eff} 随着 I 的增加而先达到一个最大值,然后有较大的减少。图 3 中的 b 图是 B 类晶体的强度特性因子 $\eta(I)$ 的理论曲线。两种情况下 $\eta(I)$ 随 I 的变化趋势相似。但同一光强下, $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 值小时所对应的 $\eta(I)$ 的值要比 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 值大时所对应的 $\eta(I)$ 的值要小。图 3 中的 c 图是 B 类晶体的增益系数 Γ 的强度特性曲线。由图中可以看出,当 $I = 0.04 \text{ w/cm}^2$ 时,两条曲线相交。当 I 小于 0.04 w/cm^2 时, $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 值大时所对应的 Γ 值大于 $S_D \mathcal{Y}_T / S_T \mathcal{Y}_D$ 值小时所对应的 Γ 值。而当 $I > 0.04 \text{ w/cm}^2$ 时,情况正好相反。



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 The calculated total effective trap density N_{eff} , intensity dependent factor $\eta(I)$ and gain coefficient Γ as a function of intensity I in a type-B two-centre crystal. (a) $N_{eff} \sim I$, (b) $\eta(I) \sim I$, (c) $\Gamma \sim I$. $M_T = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

All the other parameters are the same as that in Fig. 2

计算过程中,其它参数选取如下: $n = 2.30$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T = 300 \text{ K}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $r_{eff} = 80 \text{ pm/v}$, $\lambda = 514.5 \text{ nm}$, $\theta = 15^\circ$

4 结 论

对两中心模型光折变晶体的增益系数 Γ 的强度特性进行了理论研究。分析表明,对于两类不同类型的光折变晶体, N_{eff} , $\eta(I)$ 和 Γ 的强度特性的差别较大,这是由于 A 类晶体和 B 类晶体有着不同的能级结构。这种模型的研究对认识光折变晶体内部结构是十分有益的。

参考文献:

- [1] Kukhtarev N V, Markov V B, Odulov S G, et al. Holographic storage in electrooptic crystals[J]. *Ferroelectrics*, 1979, 22: 949– 956.
- [2] Feinberg J, Heiman D, Tanguay A R, Jr. et al. Photorefractive effects and light-induced charge migration in barium titanate[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, 51: 1279– 1281.
- [3] Brost G A, Motes R A, Rotge J R. Intensity-dependent absorption and photorefractive effects in barium titanate [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, B5(9): 1879– 1885.
- [4] Hu Juguang, Xu Xinguang, Mu Xiaodong, et al. Temperature dependence of photorefractive properties of a Cu-doped barium strontium potassium sodium niobate crystal[J]. *Opt. Commun.*, 1999, 164(6): 219– 222.
- [5] 吉选芒, 王金来, 安毓英, 刘劲松. 热效应对光折变晶体双光束耦合特性影响的参数理论分析[J]. *光学学报*, 1998, 18(3): 291– 295.
- [6] Tayebati P, Mahgerefteh D. Theory of the photorefractive effect for $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and BaTiO_3 with shallow traps[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1991, B8: 1053– 1064.
- [7] Chi Mingjun, Dou S X, Zhu Yong, Ye Peixian. Wavelength dependence of the effective trap density in Rh-doped BaTiO_3 : a comparison between theory and experiment. [J]. *Opt. Commun.*, 1999, 170(11): 115– 120.
- [8] Machgerefth D, Feinberg J. Explanation of the apparent sublinear photoconductivity of photorefractive barium titanate[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64: 2195– 2199.
- [9] CHI Ming-Jun, Dou shuo-xing, Ye Pei-xian. Theoretical study of the intensity dependence of total effective trap density in photorefractive crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, 8(9): 664– 669.

Theoretical study of the intensity dependence of two-beam coupling gain coefficient in photorefractive crystals

JI Xuan-mang¹, AN Yu-ying², LIU Jin-song²

(1. Department of Physics, Yuncheng Advanced Training College, Yuncheng 044000, China;

2. Applied Physics College, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Intensity dependence of the two-beam coupling gain coefficient Γ , the effective trap density N_{eff} and the intensity dependent factor $\eta(I)$ is studied theoretically for the two-centre photorefractive crystals. The results show that N_{eff} , $\eta(I)$ and Γ have more complicated behaviors in two-centre crystals. When $S_D Y_T / S_T Y_D$ is small, N_{eff} increases and tends to saturate with increasing intensity for both type-A and type-B two-centre crystals. When $S_D Y_T / S_T Y_D$ is large, N_{eff} increases to a maximum and then decreases a little for type-A crystals and decreases greatly for type-B crystals. The different intensity dependence of Γ in the two types of crystals comes from their different level structures.

Key words: photorefractive crystals; two-wave coupling; gain coefficient; intensity dependence.

作者简介: 吉选芒(1965-),男,山西临猗人,工学硕士,副教授,从事物理教学工作 and 光折变非线性光学的研究工作。