

KNbO₃:Fe 二波耦合温度效应研究*

王威礼 王德煌 郑英俊

(北京大学物理系, 北京, 100871)

摘要 报道了 KNbO₃:Fe 在 514.5 和 632.8 nm 二波耦合增益系数随温度 (290~370 K) 变化的实验结果, 分析研究了温度对暗电导、电光系数和扩散场的影响, 通过对电光系数 r_{51} 为主的实验和理论曲线的拟合, 得到了室温 (300 K) 暗电导和光电导之比 $B = \sigma_d / \sigma_p$ 及其它参数值.

关键词 铌酸钾 (KNbO₃), 光折变, 二波耦合.

光折变效应在光信息处理等领域已具有广阔的应用前景^[1]. KNbO₃ 是一种具有较高品质因子的非线性光折变晶体, 在室温附近是一种氧八面铁电体, 属于斜方晶系, 具有 2mm 点群对称性. 在 KNbO₃ 晶体中掺入适量的 Fe 会显著地提高光折变效应, Fe 杂质以离子形式 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 构成深能级, 并位于 KNbO₃ 的禁带中. 我们通过温度变化来影响热激发和载流子分布, 并导致光折变过程中二波耦合增益系数随温度的变化, 以研究其微观物理机制.

二波耦合实验是测定光折变晶体性能最有效的方法, 而二波耦合增益系数又是表征光折变晶体材料的重要参量之一. 增益系数 Γ 可表示为^[2]

$$\Gamma = \frac{2\pi n^3}{\lambda \cos \theta} r_{\text{eff}} I_m(E_{sc}), \quad (1)$$

式中 n 是晶体的平均折射率, λ 是入射光的波长, 2θ 是两束入射光在晶体内的夹角, r_{eff} 是有效电光系数, 与光栅矢量对光束的偏振方向有关, E_{sc} 是空间电荷电场的幅值. 在单一载流子 (电子或空穴) 和无外电场或光伏电场时, 空间电荷电场为纯虚数值, 可表示为^[3]

$$I_m(E_{sc}) = m \frac{E_d}{1 + E_d/E_q}, \quad (2)$$

其中 $m = 2\sqrt{I_s I_p} / (I_s + I_p)$ 是相干的信号光 I_s 和参考光 I_p 构成的调制度; E_q 是最大空间电荷电场, 并有 $E_q = 2\pi e N \Lambda_g (\epsilon \epsilon_0)$, 这里 E 和 E_0 是相对和真空介电常数, N 是掺杂浓度, e 是电子电荷, $\Lambda_g = \lambda / (2n \sin 2\theta)$ 是光栅的周期长度; $E_d = 2\pi k_B T / (e \Lambda_g)$ 是扩散场, 其中 $k_B T$ 是热能, k_B 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度.

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 2 月 1 日收到, 修改稿 1994 年 1 月 26 日收到

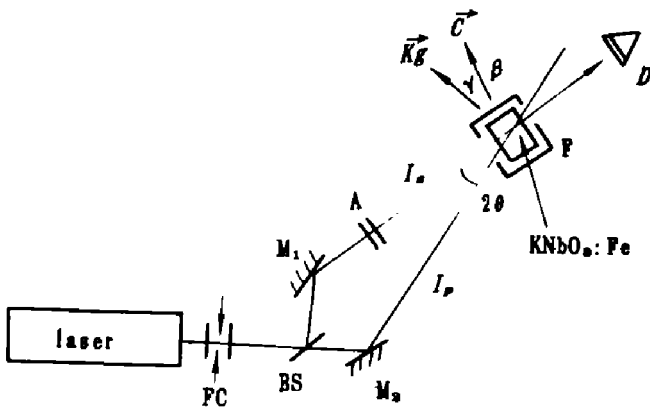


图 1 KNbO₃:Fe 二波耦合温度效应实验装置
Fig. 1 Experimental set-up for temperature dependence of two-wave coupling in KNbO₃:Fe

KNbO₃:Fe 光折变晶体二波耦合温度效应实验装置如图 1 所示. 利用 Ar⁺ 激光器 (514.5 nm) 或 He-Ne 激光器 (632.8 nm) 的基模激光束, 经滤波与准直光学系统 FC 后得到 $\phi = 1.0\text{ mm}$ 的光束, 它们的光强分别为 $I_{514.5} = 1.5\text{ W/cm}^2$ 或 $I_{632.8} = 0.88\text{ W/cm}^2$. 经分束片 BS 和衰减片 A 后, 可使两相干信号光 I_s 与参考光 I_p 的比值 $R = 1.2 \times 10^{-4}$. KNbO₃:Fe 样品的掺杂浓度 $N = 1.8 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, 样品尺寸为 $a \times b \times c = 5.4 \times 4.7 \times 4.8\text{ mm}^3$. 实验过程中样品放在加热控温装置中, 控温精度为 0.2°C . 将加热套连同样品放在可旋转的平台上, 由转盘刻度读出光折变晶体光轴 \vec{c} 与折射率

光栅矢量 $\vec{k}_g (k_g = 2\pi/\Lambda_g)$ 间的夹角 β 值. 当两束水平偏振光从晶体的 c 面入射、且入射面与 b 面平行时, 有效电光系数为^[4]

$$r_{\text{eff}} = \frac{\cos \beta}{2} \left[n_1^4 r_{13} (\cos 2\theta - \cos 2\beta) + 4n_1^2 n_3^2 r_{51} \sin^2 \beta + n_3^4 r_{23} (\cos 2\theta + \cos 2\beta) \right]. \quad (3)$$

图 2 分别给出实验条件为 $2\theta = 10.8^\circ$ 、 $\beta = 78.5^\circ$ (514.5 nm) 和 $2\theta = 11.3^\circ$ 、 $\beta = 76.1^\circ$ (632.8 nm) 时二波耦合增益系数温度效应的实验测量结果. 由于电光系数 $r_{13} = 28$ 、 $r_{23} = 1.3$

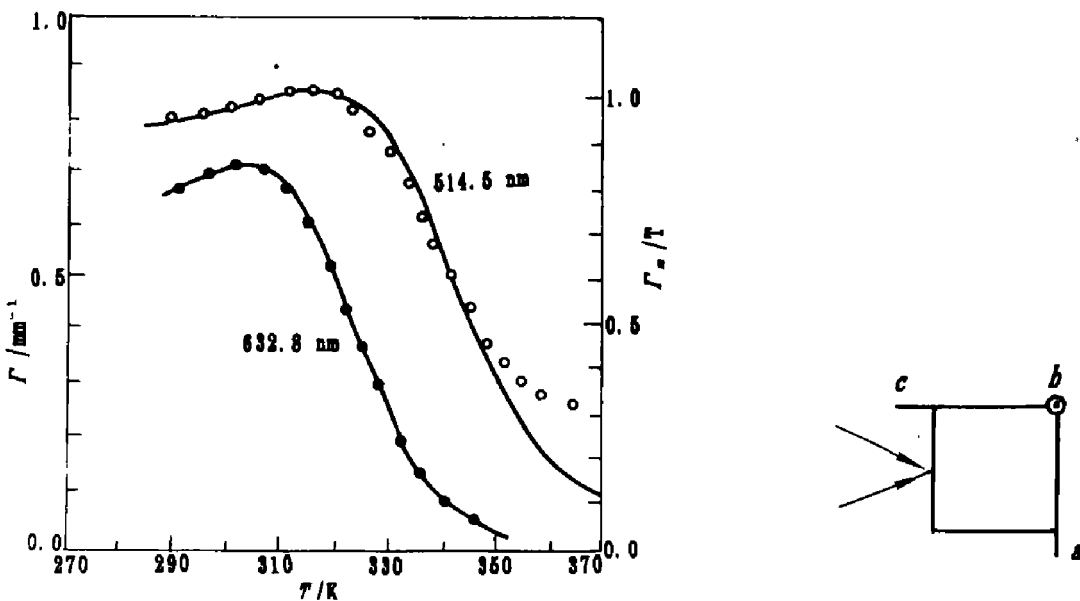


图 2 514.5 nm 和 632.8 nm 二波耦合增益系数随温度变化的测量结果
(计算曲线 $\Gamma_n(T)$ 是归一化的增益系数)

Fig. 2 Measured two-wave coupling gain coefficients as a function of temperature at 514.5 nm and 632.8 nm wavelengths (the calculated curves $\Gamma_n(T)$ are the normalized gain coefficients)

和 $r_{51} = 105$, 因此, 式 (5) 等号右侧的第一项和第三项可忽略, 近似表达为

$$r_{\text{eff}} = 2n_1^2 n_3^2 r_{51} \cos \beta \sin^2 \beta. \quad (4)$$

测量得到的二波耦合增益系数可认为主要是电光系数 r_{51} 的贡献.

为了解释实验观察现象, 可采用由单一载流子和单一杂质能级模型所得到的公式 (1). 在分析温度效应时, 除了扩散场与温度有关外, 实际上二波耦合增益系数还应该与 $1 + \sigma_d / \sigma_p$ 因子成反比^[5]. 该因子表征光折变效应中暗电导 σ_d 和光电导 σ_p 的竞争过程. 暗电导是光折变晶体中深能级杂质上的电子 (或空穴) 被热激发到导带 (或价带) 的过程, 因此, 它与深能级的位置 E_t 和温度 T 有关. 暗电导可表示为^[6] $\sigma_d = \sigma_0 T^{\frac{3}{2}} \exp(-E_t / k_B T)$, 这里 σ_0 是与晶体材料有关的比例常数. 光电导可表示为 $\sigma_p = SI$, 这里光电导与光强 I 和光激发截面 S 成正比, 光激发截面与光电导对温度的依赖很小, 可视为常量. 通常电光系数是温度的函数^[7], 电光系数 r_{51} 随温度变化的经验公式可表示为 $r_{51}(T) = (r_{51})_0 \exp[a(T - T_0)]$. 其中 $(r_{51})_0$ 是室温 $T_0 = 300 \text{ K}$ 时的电光系数值, 而 $a = 8 \times 10^{-3}$ 是随温度变化的比例系数. 为了与实验结果进行定量比较, 可以采用以下归一化的二波耦合增益系数表达式^[8]:

$$\Gamma_n(T) = \frac{(r_{51})_0 \exp[a(T - T_0)]}{1 + B \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left[\left(\frac{E_t}{k_B}\right)\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]}. \quad (5)$$

式中 B 是归一化因子, 它的数值等于室温时暗电导与光电导的比值, 即

$$B = \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_p}\right)_{T_0} = \frac{\sigma_0 T_0^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_t}{k_B T_0}\right)}{SI}. \quad (6)$$

利用式 (5) 可进行理论曲线与实验结果的拟合计算. 由深能级能量位置 $E_t = 1.4 \text{ eV}$ ^[9], 对 514.5 nm 二波耦合温度效应分析可得归一化因子为 $B_{\text{Ar}} = 1 \times 10^{-3}$. 由于二波耦合增益系数与波长成反比, 对波长为 632.8 nm 时应对式 (5) 乘以因子 $\lambda_{\text{Ar}} / \lambda_{\text{He-Ne}} = 0.81$, 分析结果可得 $B_{\text{He-Ne}} = 1.5 \times 10^{-2}$. 以上两者归一化因子的差异是不同光波长的光激发截面不同所造成的, 即有 $S_{\text{Ar}} / S_{\text{He-Ne}} = 1.5$. 显然, 以上对 KNbO₃:Fe 晶体的分析方法可适用于其它光折变晶体.

致谢 感谢北京人工晶体研究所提供的实验样品.

参考文献

- 1 Anderson D Z. *Opt. Lett.*, 1986,11:45
- 2 Klein M B, Valley G C. *J. Appl. Phys.*, 1985,57:4901
- 3 Medrano C, et al. *J. Appl. Phys.*, 1988,64:4668
- 4 王威礼, 等. *发光学报*, 1991,12:12
- 5 George A, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988,53:1465
- 6 Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Wiley, 1981. 15
- 7 Gunter P. *Opt. Comm.*, 1974,11:285
- 8 Cheng L, Partovi A. *Appl. Phys. Lett.*, 1986,49:1456
- 9 Gunter P. *Phys. Rep.*, 1982,93:201

KNbO₃:Fe TEMPERATURE DEPENDENCE OF TWO-WAVE COUPLING*

Wang Weili Wang Dehuang Zheng Yinjun

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract The experimental results of the temperature (290~370 K) dependence of two-wave coupling in KNbO₃:Fe at 514.5 and 632.8 nm are presented. The effects of temperature variation on the dark conductivity, electro-optical coefficient and diffusion field are analyzed. By comparing experiments and theoretical curves dominated by electro-optical coefficient r_{51} , the ratio $B = \sigma_d/\sigma_p$ of dark conductivity to photoconductivity at room temperature 300 K and other parameters are obtained.

Key words potassium niobate (KNbO₃), photorefractive, two-wave coupling.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China