

外电场作用下红外光折变 GaAs 的 双光束耦合增强效应

王威礼 王德煌 让庆澜 张合义

(北京大学物理系, 北京 100871)

报道了立方晶体 GaAs:Cr 在外电场作用下的红外光折变增强效应, 着重分析双光束耦合过程中空间电荷电场幅度和位相的空间分布变化情况. 计算结果很好地解释了实验测量结果.

关键词: 红外光折射效应, 砷化镓(GaAs), 光学耦合.

1 引言

目前, 光折变效应的研究在非线性光学领域中是极为活跃的课题之一, 在室温和毫瓦量级激光功率下实现光折变非线性光学效应的独特优点具有广阔的应用前景. 早期对电光晶体材料的光折变研究大部分集中于 BaTiO₃^[1], KNbO₃^[2] 和 Ba_{0.25}Sr_{0.75}Nb₂O₆ (简称 SBN)^[3] 等耦合系数较大的氧化物铁电晶体, 它们的主要缺点是响应速度慢并且仅能适用于可见光波段. 近年来, 化合物半导体光折变晶体的快速响应和近红外应用特点日益引起人们的兴趣, 其中尤以 GaAs 的红外光折变效应更引起重视.

2 理论分析

2.1 立方晶体中有效普克尔系数 r_{eff}

GaAs 光折变晶体具有闪锌矿结构, 属于 $\bar{4}3m$ 立方点群, 其电光系数 $r_{41} = r_{52} = r_{63} = 1.43 \text{ pm/V}$ ($\lambda = 1.15 \mu\text{m}$). 在空间电荷电场作用下, 极化率 χ 为^[4]

$$\chi = -\epsilon_{\omega} \cdot (R \cdot EK_g) \cdot \epsilon_{\omega}, \quad (1)$$

其中 ϵ_{ω} 是频率为 ω 的电介张量, R 是三阶电光张量, E 是电场幅度, K_g 是光栅矢量. 相应的有效普克尔系数为

$$r_{eff} = \hat{e}_1^* \cdot \chi \cdot \hat{e}_2, \quad (2)$$

这里 \hat{e}_1 和 \hat{e}_2 是两入射光束的单位偏振矢量.

图 1 为 GaAs 晶体的二波耦合实验配置, 光束 I_1 和 I_2 从 (1 1 0) 晶面射入, 在晶体内

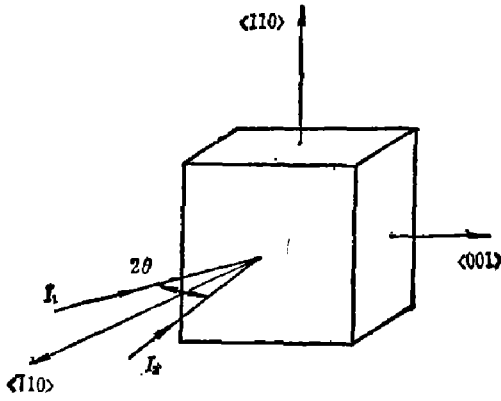


图1 GaAs 立方晶体和两束入射光的实验配置图

Fig.1 Schematic of experimental configuration for two-beam coupling in GaAs cubic crystal

的夹角为 2θ , 按动量守恒要求形成的相位光栅矢量 K_g 的方向是沿 $\langle 0 \ 0 \ 1 \rangle$ 晶向的, 而极化率张量为

$$\chi = n^4 r_{41} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} E = n^4 r_{41} E (\hat{X}\hat{Y} + \hat{Y}\hat{X}). \quad (3)$$

其中 \hat{X} 和 \hat{Y} 分别是沿 $\langle 1 \ 0 \ 0 \rangle$ 和 $\langle 0 \ 1 \ 0 \rangle$ 晶向的单位矢量, 因此立方晶体中的有效普克尔系数 r_{eff} 还与两入射光束的偏振方向有关. 当两束入射光的偏振方向垂直于入射平面时, 有效普克尔系数为

$$r_{eff} = n^4 r_{41} \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right) \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{pmatrix} = n^4 r_{41}. \quad (4)$$

2.2 双光束耦合产生的空间电荷电场

两相干光束 I_1 和 I_2 在晶体内形成的干涉光强为^[5]

$$I = I_0(1 + m \cos K_g Z), \quad (5)$$

式中 $I_0 = I_1 + I_2$ 是两光束的总光强, $m = 2(I_1 I_2)^{1/2} / I_0$ 是光强的调制度, 光栅矢量 K_g 与光栅的周期 Λ_g 满足 $K_g = 2\pi / \Lambda_g$. 按能带输运模型分析, 光激发载流子分布为

$$n = n_0 [1 + m \cos(K_g Z)], \quad (6)$$

其中 n_0 对应于光强 I_0 激发的载流子浓度. 将式(6)代入电流密度方程

$$J = e\mu n E + eD \frac{\partial n}{\partial Z}, \quad (7)$$

可得到空间电荷电场分布为

$$E = \frac{J}{e\mu n_0} \cdot \frac{1}{1 + m \cos(K_g Z)} - \frac{DK_g}{\mu} \cdot \frac{m \sin(K_g Z)}{1 + m \cos(K_g Z)}, \quad (8)$$

其中 μ 和 D 分别为迁移率和扩散系数. 电场 E 沿 Z 方向的长度 L 积分后为外加电压 V , 故偏置电压引起的电场为

$$E_A = \frac{V}{L} = \frac{1}{L} \int_0^L E dZ.$$

利用

$$\frac{1}{L} \int_0^L \frac{dZ}{1 + m \cos(K_g Z)} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}},$$

$$\frac{1}{L} \int_0^L \frac{m \sin(K_g Z)}{1 + m \cos(K_g Z)} dZ = 0$$

和

$$J = (1 + m^2)^{1/2} e\mu n_0 E,$$

方程(8)可写成

$$E = E_A \frac{1-m^2}{1+m \cos(K_g Z)} - E_D \frac{m \sin(K_g Z)}{1+m \cos(K_g Z)}, \quad (9)$$

其中 $E_D = \frac{D}{\mu} K_g$ 是扩散电场。

图 2(a)~(e) 是当 $\Lambda_g = 1 \mu\text{m}$ ($E_D = 1.6 \text{ kV/cm}$), m 和 E_A 取不同值时, 由式(9)得到的理论计算曲线。图 2 表明了空间电荷电场的变化趋势, 除了空间电荷电场幅度变化外, 其峰值(谷值)或相位亦随外电场的增加由 $\frac{\pi}{2}$ 向原点移动。为了进一步描述相位变化, 可将空间电荷电场方程(9)按傅氏级数展开为

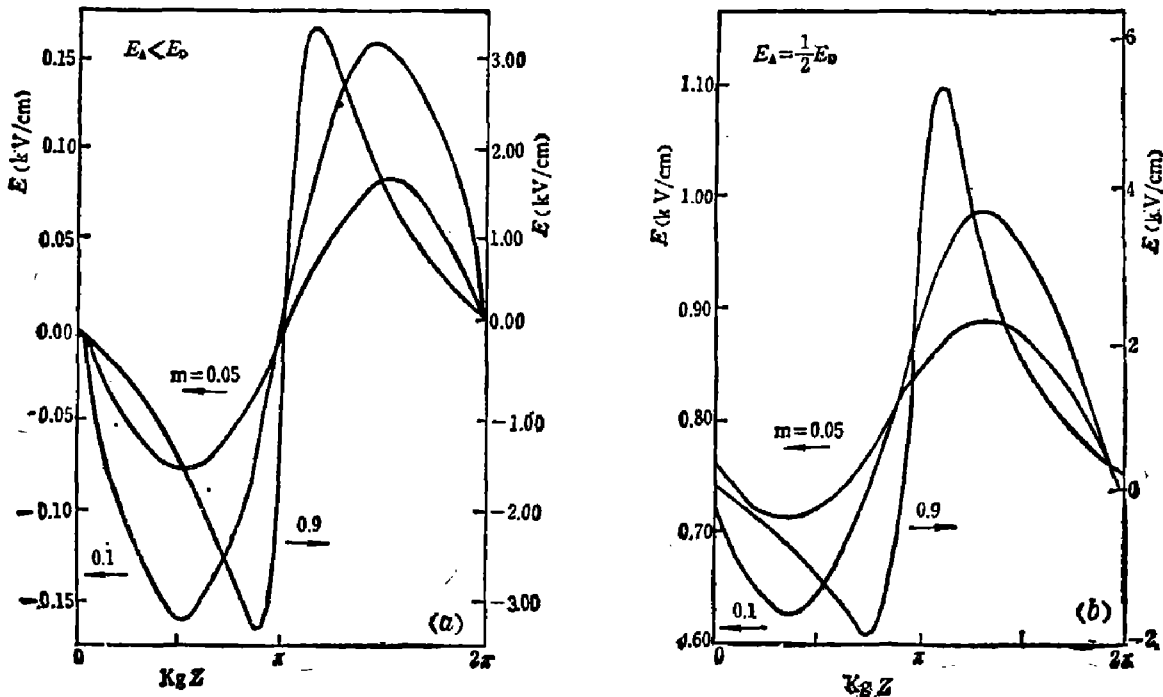
$$E = \sum_{l=-\infty}^{\infty} E_l \exp(i l K_g Z),$$

其中 $E_0 = E_A$, $E_{-l} = E_l^*$, $E_l = (E_A + i E_D) (-1)^l \left(\frac{1 - \sqrt{1-m^2}}{m} \right)^l$ ($l > 0$)。展开式中的一级基本分量为

$$\begin{aligned} E_G &= E_1 \exp(i K_g Z) + E_{-1} \exp(-i K_g Z) \\ &= -2 \left(\frac{1 - \sqrt{1-m^2}}{m} \right) (E_A^2 + E_D^2)^{\frac{1}{2}} \cos(K_g Z + \phi), \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{E_D}{E_A} \right). \quad (11)$$



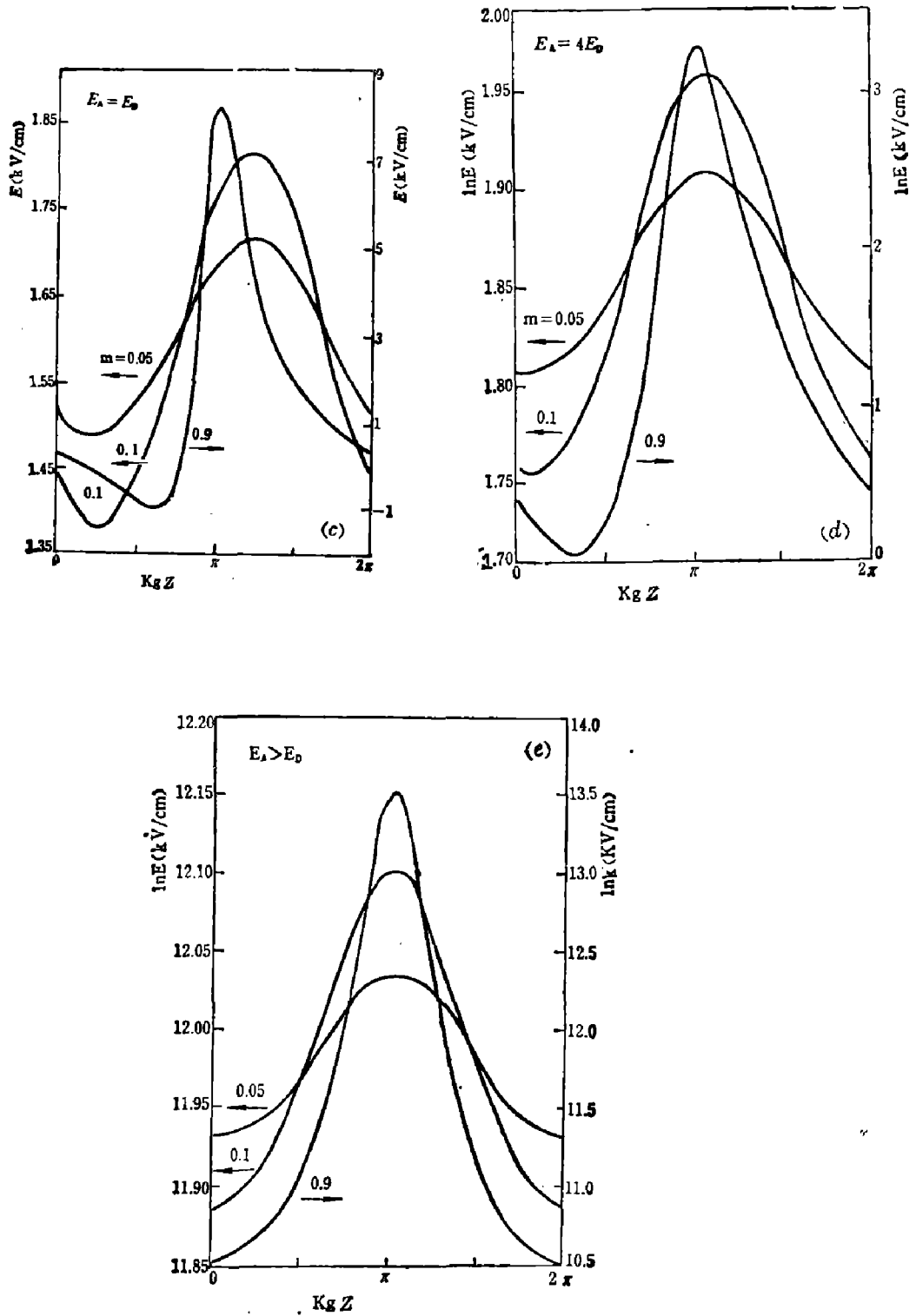


图 2 $E_D=1.6$ kV/cm 和不同外电场作用下双光束耦合中空间电荷电场分布 ($m=0.05, 0.1, 0.9$)

Fig. 2 The space charge field distribution of two-beam coupling for different externally applied electric fields and $m=0.05, 0.1, 0.9$ at $E_D=1.6$ kV/cm

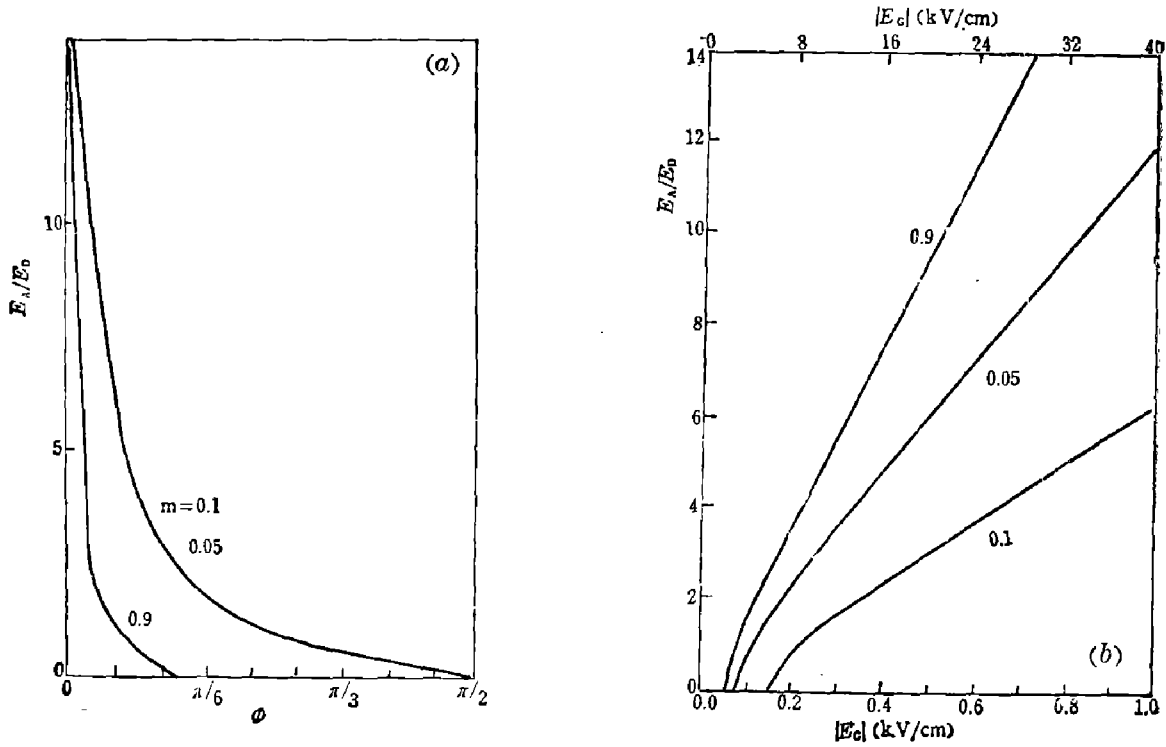


图3 (a) 空间电荷电场的位相随外电场的变化
(b) 空间电荷电场的幅值随外电场的变化

Fig. 3 (a) The phase shift of space charge field vs externally applied electric field
(b) The amplitude variation of space charge field vs externally applied electric field

图3(a)和(b)分别画出电场的位相和幅值随外电场 E_A 变化的情况, 当调制深度较大(如 $m=0.9$) 时, 电场偏离余弦函数, 故级数展开式中应计及较高级的分量。

2.3 在外电场下的双光束耦合增益系数

对于电光系数较小 ($r_{eff} \approx 1 \text{ pm/V}$) 的材料, 如 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSD), $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) 和 GaAs 等, 具有快响应, 高灵敏及适用于近红外波段等优点, 而较小的电光系数可用外加偏置电压来弥补。在外加直流电场时双光束耦合的增益系数为

$$\Gamma = 2\delta E_D \frac{1 + \frac{E_D}{E_q} + \frac{E_A^2}{E_q E_D}}{\left(1 + \frac{E_a}{E_D}\right)^2 + \left(\frac{E_A}{E_q}\right)^2} \quad (12)$$

式(12)中 $\delta = \frac{\pi n^3 r_{eff}}{\lambda_0 \cos \theta}$, $E_q = \frac{2eN_A A_g}{\epsilon}$, 这里 λ_0 是真空中激光波长, 2θ 是两相干光束的夹角, N_A 是位于能隙中央附近俘获中心的浓度。GaAs 晶体的 $n=3.4$, $\epsilon=12.9$ 。

3 实验测量与结果

红外双光束耦合实验装置如图4所示, $1.15 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 红外激光经分束器后, 得到两束相干光 I_1 和 I_2 在掺 Cr 的 GaAs 样品中相交。GaAs:Cr 是高阻半绝缘材料(电阻率 $\rho=2.2 \times 10^8 \Omega\text{cm}$, 迁移率 $\mu=4830 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 在 $1.15 \mu\text{m}$ 处的吸收系数 $\alpha=1.47 \text{ cm}^{-1}$), 样品尺寸为 $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$, 两个 $(\bar{1} \ 1 \ 0)$ 晶面经过抛光作为光束的入射和出射表面, 两个

(0 0 1) 晶面涂银胶, 并与外加直流高压电源相接. 增益系数的测量按方程^[6]

$$\Gamma = \frac{1}{L} \ln \frac{I_1 \text{ with } I_2}{I_1 \text{ without } I_2} \quad (14)$$

进行. 经斩波器调制的入射光束 I_2 经过 GaAs 样品后, 被 InGaAs/InP 探测器, 前置放大器和锁定放大器接收, 分别记录光束 I_1 被阻挡与不被阻挡时光束 I_2 的测量值, 即可得到增益系数 Γ 的实验值.

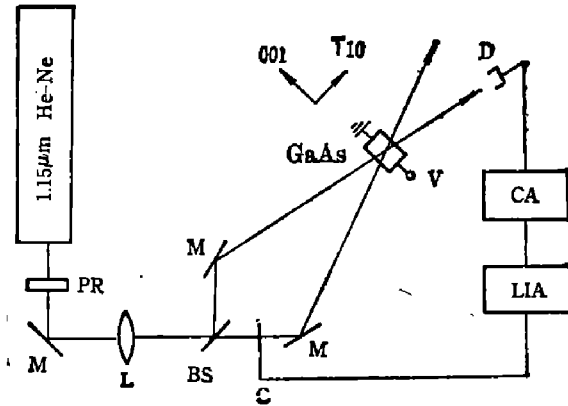


图4 外电场作用下 GaAs 红外双光束耦合实验装置

Fig. 4 The experimental set-up for infrared two-beam coupling in GaAs with externally applied field

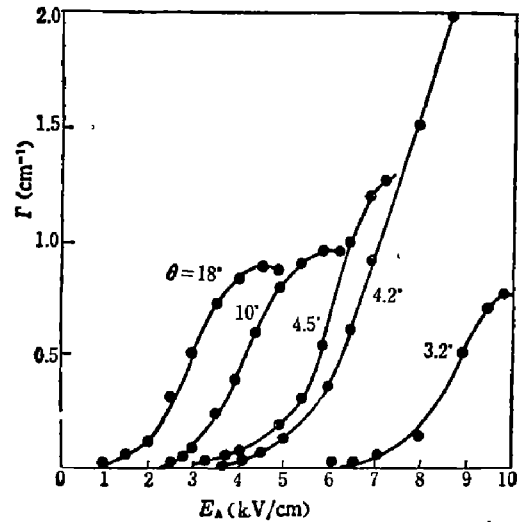


图5 外电场作用下双光束耦合增益系数的实验结果

Fig. 5 Experimental results of gain coefficient for two-beam coupling with externally applied electric fields

为了更好地显示双光束耦合的增益系数与外电场的依赖关系, 我们取较小的相干光束夹角 2θ , 这是由于该光栅周期 Λ_g 较大, 在无外电场时的本征扩散力和空间电荷电场较小, 因此外电场的效果更为显著. 实验测量结果如图5所示, 与我们计算分析一致. 空间电荷电场随外电场而增加, 使双光束耦合的增益系数亦随之增长. 但随着外电的进一步增长, 导致光强干涉光栅图样和折射相位光栅之间的相位差由 $\frac{\pi}{2}$ 变为趋于零, 破坏了双光束耦合过程中的能量转移, 从而在实验上观察到增益系数的饱和并出现峰值现象. 在我们的实验样品中, 双光束耦合随外电场的增强效应随两相干光束夹角的 2θ 变化较为敏感, 其最佳夹角 $2\theta \approx 8^\circ$. 显然, 对不同掺杂浓度的样品会得到不同的结果.

参 考 文 献

- 1 Ducharme S, Feinberg J. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986; **31**:283
- 2 Gunter P. *Physics Reports*, 1982; **93**: 201
- 3 Cronin-Golomb M, Brandle C D. *Opt. Lett.*, 1989; **14**: 462
- 4 Fainberg J. *Appl. Phys.*, 1980; **5**: 1297
- 5 Pauliat G et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986; **3**: 306
- 6 Valley G. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1984; **1**: 868
- 7 Kukhtarev N V et al. *Ferroelectrics*, 1976; **22**: 961

ENHANCED EFFECT OF TWO-BEAM COUPLING IN INFRARED PHOTOREFRACTIVE GaAs UNDER EXTERNAL ELECTRIC FIELD

WANG WEILI, WANG DEHUANG, RANG QINGLAN, ZHANG HEYI

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

The enhanced infrared photorefractive effect in cubic crystal GaAs under externally applied electric field is described. The spatial amplitude and phase variations of space charge electric field in the two-beam coupling process are emphatically analyzed, which quite well explain the results of experimental measurement.

Key words: Infrared photorefractive effects, gallium arsenide (GaAs), optical coupling.