

半绝缘 GaAs:Cr 晶体 $1.06 \mu\text{m}$ 三波混合研究

张景文 赵 桦 孙万钧 孙秀冬 许克彬

(哈尔滨工业大学应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨, 150001)

摘要 从理论和实验上研究了半绝缘掺铬砷化镓 (GaAs:Cr) 晶体在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长处的两种简并三波混合的增益特性. 利用位移光栅及外加电场等技术, 实现了双信号独立的纯放大, 利用双泵浦提高了单一信号的放大倍数.

关键词 光折变效应, 三波混合, GaAs:Cr, 光学信号, 放大.

引言

随着光计算研究的展开, 光学集成技术也在不断发展. 正如基质硅在微电子学中的重要性, 不言而喻, 在微光子学中寻找类似的基本光学材料的工作也在不断进行. 掺铬砷化镓 (GaAs:Cr) 晶体因兼备响应速度快及便于实时处理, 高灵敏度, 低功耗, 近红外操作, 在其中可作源器件等优点, 近年来受到国内外光学工作者的普遍关注^[1~5]. 另外, 微电子学的发展使人们对 GaAs:Cr 这类半导体材料的固有性质研究得较为透彻, 人们自然期望对 GaAs:Cr 晶体取得突破. 在未来的光学系统中, 多信号并行处理是其主要特征之一. 故研究 GaAs:Cr 晶体内的多波过程有着极为深远的意义. 本文报道了半绝缘 GaAs:Cr 晶体的双信号单泵浦简并三波混合的研究结果, 还报道了单信号双泵浦这一提高放大倍数新方法的实验结果.

1 双信号单泵浦三波混合的理论及实验结果

GaAs:Cr 双信号单泵浦三波混合的实验装置示于图 1. 工作在横基模的 YAG 连续激光器提供 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 的入射光. 图中光的偏振方向垂直于入射面, 锯齿波电压加在电致伸缩微位移器上, 带动全反镜使泵浦光产生多普勒频移, 配合外加电场以提高泵浦光与信号光之间的能量耦合. 外电场加在晶体 (001) 方向上. 实验中所用的 GaAs:Cr 材料为半绝缘晶体, 电导率 $\sigma = (4.0 + 0.44I_0) \times 10^{-8} (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$, 晶体尺寸为 $6.5 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$. 为使信号光与泵浦光充分耦合, 把泵浦光扩束, 从而使低强度的信号光直径很小.

由多信号过程的一般耦合波方程^[6]得到双信号三波混合的耦合波方程为

$$\frac{dI_R}{dZ} = -\frac{I}{I_0} \left[\left(\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha} \right) \Gamma_{R2} I_{S1} I_R + \left(\frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha} \right) \Gamma_{SR2} I_{S2} I_R \right], \quad (1)$$

$$\frac{dI_{S1}}{dZ} = \frac{I}{I_0} \Gamma_{R1} I_R I_{S1} - \frac{I}{I_0} \Gamma_{12} I_{S2} I_{S1}, \quad (2)$$

$$\frac{dI_{S2}}{dZ} = \frac{I}{I_0} \Gamma_{R2} I_R I_{S1} + \frac{I}{I_0} \Gamma_{12} I_{S1} I_{S2}. \quad (3)$$

式中 α 是泵浦光与晶体表面法线之间的夹角, α_1 是第一信号光与晶体表面法线之间的夹角, α_2 是第二信号光与晶体表面法线之间的夹角, Γ 是指数增益系数, I 是晶体出射的信号光强.

实验中, 为使两信号均得到较高增益, 两信号与泵浦光光束之比 $\beta_1, \beta_2 > 10^2$. 这样, 虽然出射信号都从泵浦光获得一定能量, 但信号光与泵浦光相比仍是小量, 故可作如下近似 (忽略吸收):

$$I_0 = I_R(0) + I_{S1}(0) + I_{S2}(0) \approx I_R(0),$$

$$I_R(0) \gg \sum_{j=1}^2 I_{kj}(0) \exp(\Gamma_{R1} Z). \quad (4)$$

这样, 方程 (2)、(3) 的解为

$$I_{S1} = I_{S1}(0) \exp(\Gamma_{R1} Z), \quad (5)$$

$$I_{S2} = I_{S2}(0) \exp(\Gamma_{R2} Z). \quad (6)$$

由此看出在 GaAs:Cr 双信号三波混合实验中, 两信号均得到独立的放大, 且每个信号的指数增益系数与二波混合的相同.

二波耦合增益系数可由下式给出的参数放大倍数 γ 间接测量^[7]:

$$\gamma = \frac{I_S(\text{有泵浦})}{I_S(\text{无泵浦})} = \frac{(\beta + 1) \exp(\Gamma l)}{\beta + \exp \Gamma l}. \quad (7)$$

式中 I_S 是自晶体上出射的信号光强, Γ 是指数增益系数, l 是光在晶体内的相互作用长度 ($l=5.5$).

二波混合的指数增益系数的理论值可由下式给出^[8]:

$$\Gamma = \frac{2\pi\gamma_{\text{eff}}n^3 E_0 [1 + (E_0/E_M)^2]^{\frac{1}{2}} + E_0/E_M}{\lambda \cos \theta_i \cdot 2 \cdot 1 + E_0/E_M E_q}. \quad (8)$$

式中 γ_{eff} 、 n 、 $2\theta_i$ 分别是有效电光系数、折射率、入射光束在晶体内的夹角, $E_M = \gamma_R$, $N_A(\mu K)^{-1} = (\mu\tau_R K)^{-1} = \Lambda/\mu\tau_R 2\pi$, $b = kv\tau_{di}$, $E_q = eN_A/\epsilon_0\epsilon_s K$, 其中 γ_R 是复合常数, μ 是输运率, N_A 是受主密度, τ_R 是复合时间, v 是条纹速度, ϵ_s 是静电介质常数, τ_{di} 是介电驰豫时间, $\Lambda = \lambda/2 \sin \theta$ 是泵浦光与信号光记录光栅的空间周期. 本式适于扩散可

忽略 (即光栅周期 $\Lambda > 5 \mu\text{m}$) 情况, 且对应最佳条纹速度 (即 $v = v_{\text{Opt}}$). 式 (8) 中有关参数值为 $N_A = 4.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, $\mu\tau_R = 1.375 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{V}$, $n = 3.6$, $\gamma_{\text{eff}} = 1.35 \times 10^{-12} \text{m}/\text{V}$, $\epsilon = 13.2$, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$. 考虑实验中 $\theta < 3^\circ$, 故 $\cos \theta \approx 1$, 由此得到两信号指数增益系数的理论结果如图 2 中虚线所示.

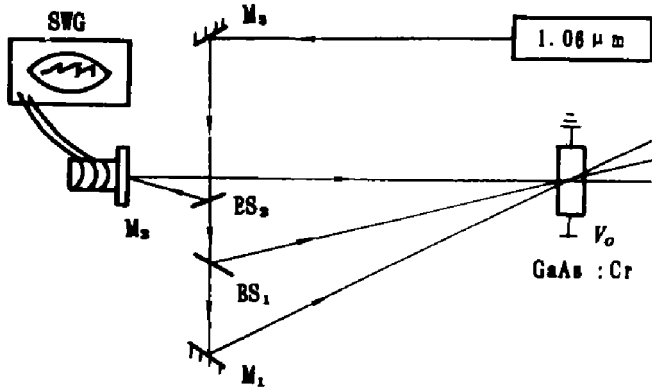


图 1 GaAs:Cr 晶体双信号三波混合实验装置图
(M_i 为全反镜, BS_i 为分束镜,
SWG 为锯齿波发生器)

Fig. 1 Set-up of three-wave-mixing of two signal beams with a GaAs:Cr crystal

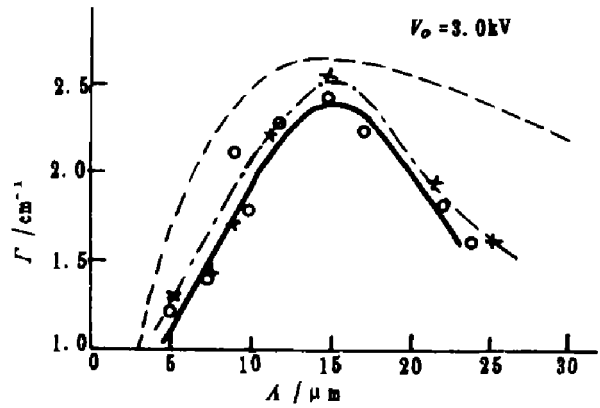


图 2 GaAs:Cr 晶体三波混合实验结果
(虚线为理论结果, 实线与点划线为实验结果)

Fig. 2 Experimental results of three-wave-mixing of two signal beams with a GaAs:Cr crystal
(---, theoretical; — and ---, experimental)

由方程 (7), 当 $\beta \gg \gamma \gg 1$ 时, 我们得到实际测量 Γ 的公式

$$\Gamma = \frac{1}{l} \ln \gamma. \quad (9)$$

GaAs:Cr 晶体双信号、单泵浦三波混合实验结果与理论曲线对比如图 2 所示.

实验在 $V = 3.0 \text{kV}$ 外加电场下进行. 图中虚线是 $V = 3.0 \text{kV}$ 对应的二波混合指数增益系数随 Λ 变化的理论曲线. 从理论曲线与实验曲线的比较看出, 对应点划线的信号 1 与对应实线的信号 2 基本上得到类似于二波混合的放大效果, 两者的差别在实验误差之内. 这与理论预期一致, 即两信号得到独立放大, 且使泵浦光能的利用率提高一倍. 实验测量值低于理论计算值的原因在于晶体与金属电极之间存在接触电压, 使加在晶体上的外电场降低. 从理论公式不难看出, 外电场 E_0 的增大会显著提高 Γ 值. 但由于半导体的光敏特点, 较强的光照会显著降低其电阻率, 使得此样品最大外电压只能到 3.5kV . 若适当降低铬的掺杂浓度可降低样品的暗电导率, 使其外加电压的上限提高, 这样可能会提高 Γ 值.

2 单信号双泵浦三波混合的理论及实验结果

GaAs:Cr 双泵浦三波混合的实验装置示于图 3, 其中元件名称请参见图 1.

实验中没有观察到 I_{R1} 、 I_{R2} 之间和能量转移, 另外, 信号光的加入对 I_{R1} 、 I_{R2} 的实测值没有影响, 这一点从 $\beta_1, \beta_2 > 10^3$ 不难理解. 由此我们可以推论, 信号光是在两独立泵

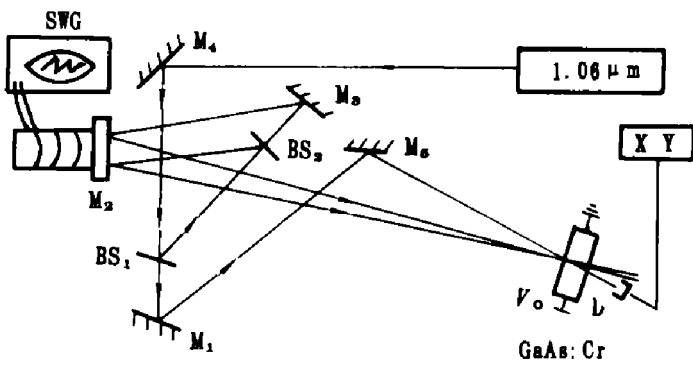


图 3 GaAs:Cr 晶体双泵浦三波混合实验装置
Fig. 3 Set-up of three-wave-mixing of two pump beams with a GaAs:Cr crystal

浦光作用下产生增益的. 由熟知的二波混全理论, 仅有泵浦光 I_{R1} 时, 信号光放大倍数为

$$\gamma_1 = \frac{I_S(1)}{I_S(0)} = \exp(\Gamma_{R1}Sl), \quad (10)$$

仅有泵浦光 I_{R2} 时的放大倍数为

$$\gamma_2 = \exp(\Gamma_{R2}Sl), \quad (11)$$

忽略双泵浦共存相互擦除作用的总放大倍数为

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \exp(\Gamma_{R1}Sl) + \exp(\Gamma_{R2}Sl), \quad (12)$$

对应 $E_0 = 4.0 \times 10^5$ (V/m) 的理论放大倍数为

$$\gamma = \exp \left\{ 0.409 \frac{[1 + (34.98/\Lambda_1)^2]^{\frac{1}{2}} + 34.98/\Lambda_1}{1 + 140.74/\Lambda_1} \right\} + \exp \left\{ 0.409 \frac{[1 + (34.98/\Lambda_2)^2]^{\frac{1}{2}} + 34.98/\Lambda_2}{1 + 140.74/\Lambda_2} \right\} \quad (13)$$

式中 $\gamma = \gamma(\Lambda_1, \Lambda_2)$ 是关于 Λ_1, Λ_2 的二元函数, 双泵浦三波混合的实验结果示于图 4, 为方便起见, 画出 γ 的 $\gamma-\Lambda_1$ 曲线. 我们发现双泵浦比单泵浦的放大倍数提高了, 但总的放大倍数小于两个分放大倍数之和, 即 $\gamma < \gamma_1 + \gamma_2$, 这说明两泵浦同时存在时对它们与信号光记录的光栅存在相互擦除.

3 结论

双信号单泵浦三波混合的理论实验研究均表明: GaAs:Cr 在高 β 值情况下信号得到独立放大, 泵浦光的能量利用率提高一倍. 由 GaAs:Cr 双泵浦三波混合实验得知, 在二波混合基础上加一束泵浦光能进一步提高放大倍数, 但两束泵浦光之间的相互擦除作用降低了泵浦光的能量利用率.

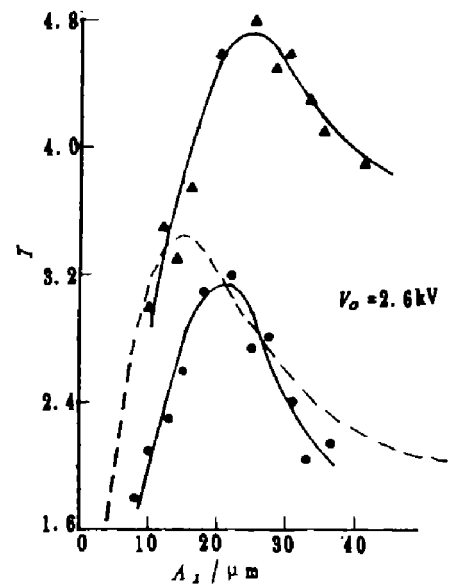


图 4 GaAs:Cr 晶体双泵浦三波混合实验结果
(虚线为单泵浦理论结果, 实线与点划线为实验结果)

Fig. 4 Experimental results of three-wave-mixing of two pump beams with a GaAs:Cr crystal (---, theoretical curve for single pump beam; —, experimental results)

参考文献

1 Klein M.B. *Opt. Lett.*, 1984,3:350

- 2 Glass A M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1984,44:948
- 3 Cheng Lijen, *et al.* *Opt. Lett.*, 1987,12:705
- 4 Imbert B, *et al.* *Opt. Lett.*, 1988,13:327
- 5 Ma H M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*,1989,54:1953
- 6 Ma Jian, *et al.* *Opt. Lett.*, 1988,13:1020
- 7 Huignard J P, *et al.* *Opt. Commun.*, 1981,38:249
- 8 Refregier Ph, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1985,58:45

THREE-WAVE-MIXING AT 1.06 μm WITH A SEMI-INSULATING GaAs:Cr CRYSTAL

Zhang Jingwen Zhao Hua Sun Wanjun Sun Xiudong Xu Kebin

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The gain performance of two kinds of degenerate three-wave-mixing at 1.06 μm wavelength with semi-insulating GaAs:Cr was studied theoretically and experimentally. Utilizing the techniques of moving grating and applied field, independent and pure amplification of two signals was realized. The gain of single signal was raised by using two pump beams.

Key words photorefraction, three-wave-mixing, GaAs:Cr, optical signal, amplification.