

在红外 GaAs 光折变晶体中透射和衍射光束的空间相互作用

王威礼 让庆澜 何雪华 戴长虹 张合义

(北京大学物理系, 北京)

摘要——给出用 $1.15\ \mu\text{m}$ 红外 He-Ne 激光在光折变 GaAs 晶体中进行相对传播双光束耦合的理论和实验研究, 透射和衍射光束偏振态空间相互作用的交流分量具有 $\sin 2\phi$ 的函数形式, 结果表明理论与实验符合很好。

关键词——GaAs 晶体, 透射, 衍射, He-Ne 激光。

1. 引 言

对电光晶体中双光束耦合的光折变效应研究已开展多年, 并已显示了许多潜在的实用价值^[1]. 近年来在高阻半绝缘 GaAs 中的光折变现象也颇受重视^[2,3], 这是因为 GaAs 有较快的响应速度, 可用于近红外波段与半导体激光器和接收器的联合, 同时, 它在小功率光强和室温条件下工作的有利条件, 使半导体光折变效应有可能用于未来的集成光学系统。

本文着重分析属于 $\bar{4}3m$ 点群的立方晶体 GaAs 的光折变现象, 在弱耦合条件下求解二波耦合非线性方程, 在两束入射光的偏振方向均垂直于入射平面或均平行于入射平面的两种情况下, 可得到透射光和衍射光的强度和偏振状态, 进而研究透射光和衍射光的耦合产生的强度和偏振状态的空间变化, 我们用 $1.15\ \mu\text{m}$ 红外 He-Ne 激光在掺 Cr 的 GaAs 光折变晶体中进行了相对传播双光束耦合实验, 测量结果完全证实了我们的理论分析。

2. 光折变立方晶体的简并二波耦合

考虑两束相同频率的偏振光在光折变立方晶体 GaAs 中的相互作用, 分别用 A_s 、 A_p 和 B_s 、 B_p 表示泵光束和信号光束垂直于入射平面矢量 \hat{S} 方向和平行于入射平面矢量 \hat{P} 方向的分量. 在弱耦合情况下, 能量交换的耦合过程中泵光束的损耗可以忽略, 因而可认为 A_s 和 A_p 是常量. 因此, 信号光束 B_s 和 B_p 的两个耦合方程为^[4]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dZ} B_s &= \gamma a B_p + \gamma b B_s, \\ \frac{d}{dZ} B_p &= \gamma c B_p + \gamma d B_s. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 γ 是耦合增益系数, $a = |A_p|^2 \cos \theta / I_0$, $b = A_p A_s^* / I_0$, $c = A_s A_p^* \cos \theta / I_0$, $d = |A_s|^2 / I_0$, 2θ 是两束光的夹角. 利用 $Z=0$ 输入端的边条件 $B_s(0)$ 和 $B_p(0)$, 可以得到耦合方程在 $Z=L$ 的解为

$$\begin{aligned} B_s(L) &= \{ [b B_s(0) + a B_p(0)] \exp[(b+c)\gamma L] + [c B_s(0) - a B_p(0)] \} / (b+c), \\ B_p(L) &= \{ [c [b B_s(0) + a B_p(0)] \exp[(b+c)\gamma L] - b [c B_s(0) - a B_p(0)] \} / a(b+c). \end{aligned} \quad (2)$$

在弱耦合 $\gamma L \ll 1$ 的近似下, 可以进一步考虑以下两种具体情况.

1. 当 $A_p(L) = B_p(0) = 0$, 即泵光束和信号光束的偏振沿 \hat{S} 方向时, 耦合方程的解公式(2)可改写成

$$\begin{cases} B_s(L) = B_s(0), \\ B_p(L) = B_s(0) \gamma L \frac{1}{1+\beta_s}. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\beta_s = |B_s(0)|^2 / |A_s(0)|^2$ 是信号光强与泵光强之比. 由此, 得到相应的光束强度为

$$\begin{cases} I_{bs}(L) = I_{bp}(0), \\ I_{bp}(L) = I_{bs}(0) (\gamma L)^2 \frac{1}{(1+\beta_s)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

可见, 两束光在立方晶体中耦合后的输出光束包括了透射信号光束 $I_{bs}(L)$, 在考虑晶体介质的吸收时, 则应乘上吸收系数的指数项. 另一部分是经过耦合后的衍射光束 $I_{bp}(L)$, 其偏振方向沿 \hat{P} 方向, 是 $(\gamma L)^2$ 的函数.

2. 当 $B_s(0) = A_s(L) = 0$, 即泵光束和信号光束的偏振方向平行于入射平面时, 式(2)应为

$$\begin{cases} B_s(L) = B_p(0) \gamma L \cos \theta \frac{1}{1+\beta_p}, \\ B_p(L) = B_p(0). \end{cases} \quad (5)$$

这里 $\beta_p = |B_p(0)|^2 / |A_p(0)|^2$ 仍然是信号光强与泵光强之比, 可得到相应光束强度为

$$\begin{cases} I_{bs}(L) = I_{bp}(0) (\gamma L)^2 \cos^2 \theta \frac{1}{(1+\beta_p)^2}, \\ I_{bp}(L) = I_{bp}(0). \end{cases} \quad (6)$$

此时, 耦合后的输出光束有和第一种情况完全类似的结果, 只是衍射光束的强度 $I_{bs}(L)$ 与两束光的夹角有关, 这是由于两束入射光的偏振虽然都在入射平面内, 但两者的偏振方向有夹角所致.

3. 透射光和衍射光偏振态的空间耦合

在测量双光束耦合的实验中, 通常对入射泵光束光路采用机械斩波器进行光调制, 对信号光束用光电接收器和锁定放大器测量被放大的交流信号, 光折变样品后面的棱镜检偏器用于光束偏振态的分析, 因此, 经检偏器后接收到的输出光强为

$$I_1(\phi) = [B_s(L)\cos\phi + B_p(L)\sin\phi]^2. \quad (7)$$

其中 ϕ 是光束通过检偏器的方向与 \hat{S} 方向或入射平面的法线方向间的夹角, 式(7)中右边的两项分别对应于透射和衍射光强的电场分量在检偏器通光方向上的投影, 当泵光束处于被斩波器挡光的条件下, 接收到的光强只有透射部分, 显然它和入射光束的偏振有关, 因此, 当 $A_p(L) = B_p(0) = 0$ 时, 透射光强为

$$I_2 = [B_s(L)\cos\phi]^2. \quad (8)$$

锁定放大器接收到的交流输出光强可表示为

$$\begin{aligned} I_{ac} &= I_1(\phi) - I_2(\phi) = B_p(L)\sin\phi [2B_s(L)\cos\phi + B_p(L)\sin\phi] \\ &= B_p(L)\sin\phi \sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2} \\ &\quad \times \left\{ \frac{2B_s(L)}{\sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2}} \cos\phi + \frac{B_p(L)}{\sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2}} \sin\phi \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

利用以下三角关系式

$$\begin{cases} \cos\delta_s = \frac{2B_s(L)}{\sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2}}, \\ \sin\delta_s = \frac{B_p(L)}{\sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2}}, \end{cases}$$

式(9)可改写成

$$I_{ac} = \frac{B_p(L)\sqrt{4[B_s(L)]^2 + [B_p(L)]^2}}{2} [\sin(2\phi - \delta_s) + \sin\delta_s]. \quad (10)$$

当 $A_s(L) = B_s(0) = 0$ 时, 透射光强为

$$I_2 = [B_p(L)\sin\phi]^2. \quad (11)$$

锁定放大器接收到的交流输出光强可表示为

$$\begin{aligned} I_{ac} &= I_1(\phi) - I_2(\phi) = B_s(L)\cos\phi [2B_p(L)\sin\phi + B_s(L)\cos\phi] \\ &= B_s(L)\cos\phi \sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2} \\ &\quad \times \left\{ \frac{2B_p(L)}{\sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2}} \sin\phi + \frac{B_s(L)}{\sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2}} \cos\phi \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

利用以下三角关系式

$$\begin{cases} \cos\delta_p = \frac{2B_p(L)}{\sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2}}, \\ \sin\delta_p = \frac{B_s(L)}{\sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2}}, \end{cases}$$

式(12)可以写成

$$I_{ac} = \frac{B_s(L)\sqrt{4[B_p(L)]^2 + [B_s(L)]^2}}{2} [\sin(2\phi + \delta_p) + \sin\delta_p]. \quad (13)$$

由于弱耦合情况, δ_s , $\sin\delta_s$ 和 δ_p , $\sin\delta_p$ 均是很小的量, 因此, 以上两种情况下, 在光折变立方晶体双光束耦合后, 输出光束偏振态空间耦合的交流光强分量均具有 $\sin 2\phi$ 的函数形式, 分别在 45° 和 135° 附近有极大值和极小值。

4. 实验结果和讨论

图 1 系实验装置示意图, 由 He-Ne 激光器得到 $1.15 \mu\text{m}$ 的红外光束经偏振面旋转器 PR 改变光束的偏振方向, 可以得到光束在晶体内传播时偏振面沿 $\langle 001 \rangle$ 或 $\langle 010 \rangle$ 晶向的线偏振光, 通过焦距为 1m 的透镜 L 和 10% 的分束片 BS 后, 分别得到泵光束 A 和信号光束 B, 以夹角 $2\theta = 165^\circ$ 分别从 GaAs 样品的一对 (100) 晶面射入. GaAs 晶体内两束光干涉产生的光栅常数 $\Lambda = 0.58 \mu\text{m}$, 样品厚度 $d = 5\text{mm}$, 掺 Cr 的 GaAs 样品电阻率 $\rho = 2.2 \times 10^8 \Omega\text{cm}$, 迁移率 $\mu = 4830 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 吸收系数 $\alpha = 1.47 \text{cm}^{-1}$. 透射和衍射光束经过可旋转的格兰棱镜 P 后由 InGaAs/InP 探测器 D、电流放大器 CA 和锁定放大器 LIA 接收, 通过棱镜 P 的旋转可测得在不同空间方位 ϕ 的偏振强度, 以验证我们的理论分析.

图 2(a)和(b)分别给出入射偏振光均沿矢量 \hat{S} 方向和入射偏振光均沿矢量 \hat{P} 方向时,

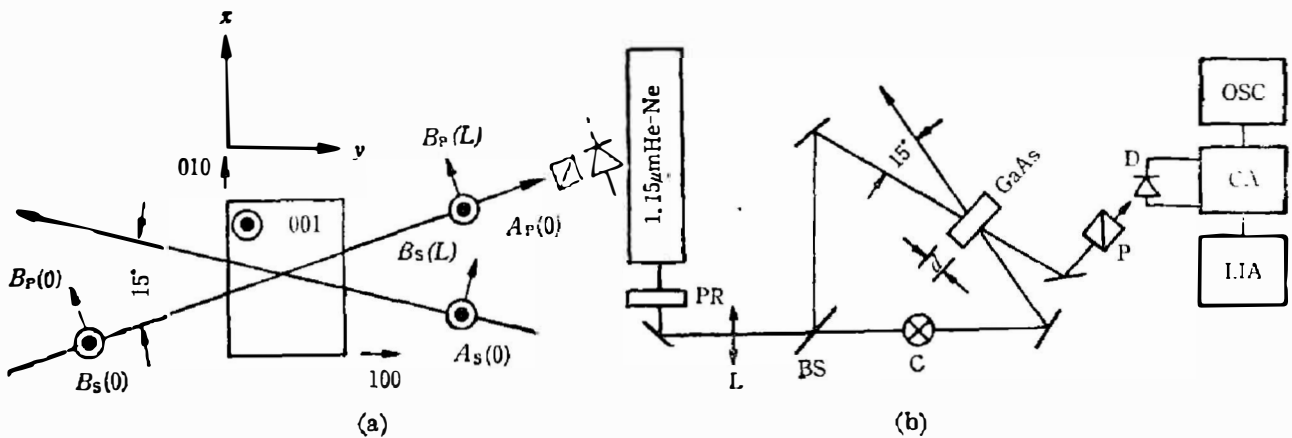


图 1 (a) GaAs 双光束耦合的几何配置图;
(b) 相对传播的双光束耦合实验装置图

Fig. 1 (a) Geometric configuration of two-beam coupling in GaAs;
(b) Sketch of the experimental set-up for counterpropagating two-beam coupling.

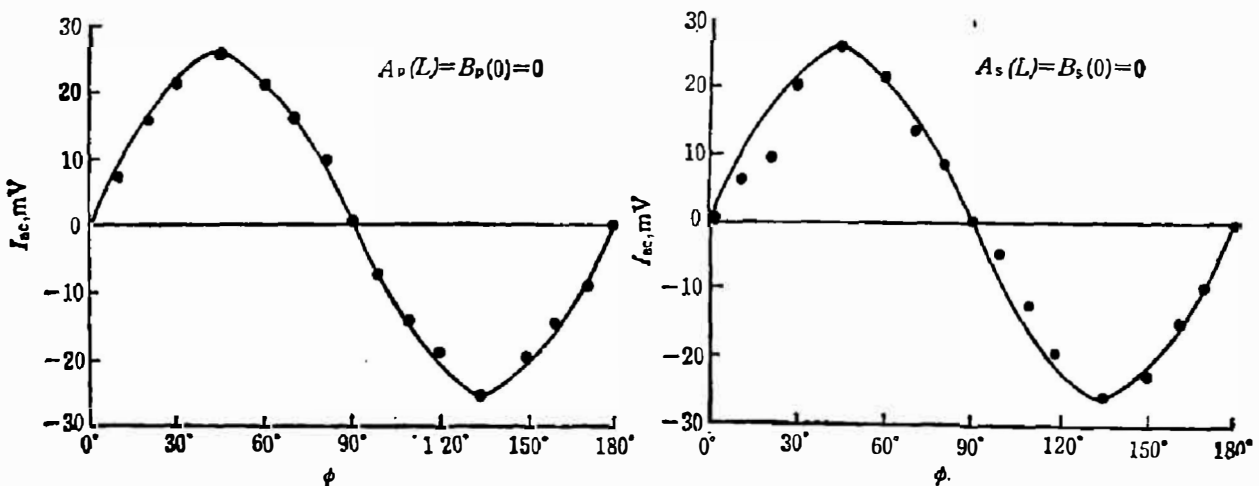


图 2 两种情况下测得的交流偏振强度 I_{ac} 与空间方位角 ϕ 的关系(实线为理论计算值)
Fig. 2 The measured ac component of polarization intensity I_{ac} as a function of spatial position angle ϕ for two cases.

双光束经光折变 GaAs 晶体后,得到的耦合光束在不同空间方位角 ϕ 的交流偏振光强 I_{ac} 的分布曲线.

实验现象的产生可归结于 A_s 和 B_s 或 A_p 和 B_p 两束入射偏振光在立方晶体 GaAs 内形成折射率光栅,而衍射光的偏振方向与入射光偏振垂直.接收器测得的交流偏振光强信号是透射光和衍射光耦合的结果,它正比于乘积 $B_s(L)B_p(L)\cos\phi\sin\phi$,所以,在空间方位角 ϕ 为 0° 、 90° 和 180° 时,测得的交流偏振光强 I_{ac} 均为零,而在 45° 和 135° 附近为极大值和极小值.

参 考 文 献

- [1] Gunter P., *Phys. Rep.*, **93** (1982), 201.
- [2] Cheng L. and Yeh P., *Opt. Lett.*, **13** (1988), 50.
- [3] Cheng L. et al., *Opt. Lett.*, **12** (1987), 705.
- [4] Yeh P., *J. Opt. Soc. Am.*, **B4** (1987), 1382.

SPATIAL LIGHT INTERACTION OF TRANSMITTED AND DIFFRACTED BEAMS IN INFRARED PHOTOREFRACTIVE GaAs CRYSTALS

WANG WEILI, RANG QINGLAN, HE XUEHUA, DAI CHANGHONG, ZHANG HEYI
(Department of physics, Peking University, Beijing, China)

ABSTRACT

Using $1.15\mu\text{m}$ infrared He-Ne laser, the theoretical and experimental investigations on the counterpropagating two-beam coupling in photorefractive GaAs crystals are presented. The spatial ac component of interacting polarization states between transmitted and diffracted beams has a functional dependence on $\sin 2\phi$. There is a good agreement between the theoretical and experimental results.