

GaAs 双光束耦合中的普克尔效应

王威礼 何雪华 让庆澜 张含义

(北京大学物理系)

1988年11月17日收到

本文报道在 GaAs 晶体中用 $1.15\mu\text{m}$ 红外 He-Ne 激光进行相对传播的双光束耦合的实验研究, 测量了透射光束偏振面的旋转角 ψ 与两束光强比 β 的关系, 这些现象可归结于光感空间电荷电场引起的线性电光效应(普克尔效应)所造成。

主题词 GaAs、光耦合、普克尔效应

一、引言

光折变晶体中的多光束耦合效应在光全息存贮、光学数据处理和相位共轭等方面具有潜在的实用价值, 一直是许多科学工作者极为关注的研究课题, 早期主要集中在耦合系数较大的 BaTiO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, LiNbO_3 和 KNbO_3 铁电晶体, 它们适用于可见波段, 但较慢的响应时间限制了许多实用的可能性。最近几年来在化合物半导体 $\text{GaAs}^{[1]}$, $\text{InP}^{[2]}$ 和 $\text{CdTe}^{[3]}$ 中实现了二波和四波混频, 其主要优点是适用于 0.95 — $1.35\mu\text{m}$ 红外波段, 和半导体激光器与接收器配合后将可用于超大规模集成电路中作为光学互连器, 此外化合物半导体的迁移率高, 所以响应时间快。因此, 化合物半导体光折变效应的研究越来越受到重视。

本文将报道在掺 Cr 的 GaAs 中用二束 $1.15\mu\text{m}$ 红外 He-Ne 激光束从一对 $\langle 100 \rangle$ 晶面相对传播的几何配置下, 这两光束干涉结果在 $\langle 100 \rangle$ 晶向产生空间电荷电场, 并通过普克尔线性电光效应, 导致透射光束偏振面的旋转。

二、基本原理

用作场效应晶体管和集成电路所需要的高阻半绝缘衬底材料, 往往通过在 GaAs 材料中掺入 $3d$ 过渡金属杂质 Cr 或利用化合物半导体固有缺陷 EL2 中心的方法来实现, 它们都显示出深能级的存在。电子自旋共振实验已确认, 在通常室温条件下, Cr 在 GaAs 中可以存在不同的带电离子状态, 在带隙中央形成能级^[4], 它们能较强地俘获浅杂质上的电子(或空穴)而导致 GaAs 成为高阻半绝缘状态, 使得在室温时的电阻率可高达 $10^8\Omega \cdot \text{cm}$ 以上, 这些深能级在近红外波段又是激发产生载流子的中心。是形成 GaAs 作为红外光折变材料的主要原因。

GaAs 是属于不具中心对称的 $\bar{4}3m$ 立方晶系, 在 $1.15\mu\text{m}$ 近红外波段有较大的线性电光系数, $r_{41} = 1.43 \text{ pm/V}$, 当两束相干光在晶体内部形成干涉图样, 并激发产生载流子, 通过漂移和扩散过程会引起载流子从亮区向暗区的移动, 结果在晶体内部造成与干涉图样相似的周期变化的内建空间电荷电场 E_{sc} , 该电场通过线性电光效应(普克尔效应)在晶体内部形成折射率的周期变化, 即形成所谓的折射率光栅, 由此可以产生一系列的非线性光学现象, 当两束相干光沿 Z 轴(即 $\langle 100 \rangle$ 晶向)的正和负方向传播时, 内建空间电荷电场矢量 E_{sc} 亦沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向, 按线性电光效应原理会生成出在 X-Y 平面上旋转 45° 角的两个新光轴 X' 和 Y' , 相应地, 存在两个新主折射率, 如图 1 所示, 新主折射率分别为^[3]:

$$n_x = n_0 + \frac{1}{2} n_0 r_{41} E_{sc}$$

$$n_y' = n_0 - \frac{1}{2} n_0 r_{41} E_{sc}$$

和

$$n_z' = n_0$$

这里 n_0 是晶体材料的本底折射率, 在通常光折变实验中, 使用弱光激发产生载流子, 此时内建空间电荷电场 E_{sc} 与掺入的深能级杂质浓度无关。在无外加电场时, 仅与两束入射光强度 $I_R(0)$ 和 $I_S(0)$ 形成的调制比或光栅干涉条纹反衬度 $M = 2[I_R(0) + I_S(0)]^{1/2}/[I_R(0) + I_S(0)]$ 有关。因而, 在双光束耦合实验中, 偏振方向沿 Y 方向(或沿 $\langle 001 \rangle$ 晶向)的入射偏振光的电场矢量可以沿着两个正交的新光轴 X' 和 Y' 分解成两个强度相等的电场分量 E'_x 和 E'_y , 由于晶体内部沿新光轴的两个新主折射率 n_x 和 n_y' 数值不等, 所以传播的光速度亦不相同, 其结果是造成经过晶体后的出射光束的偏振状态发生了偏转。

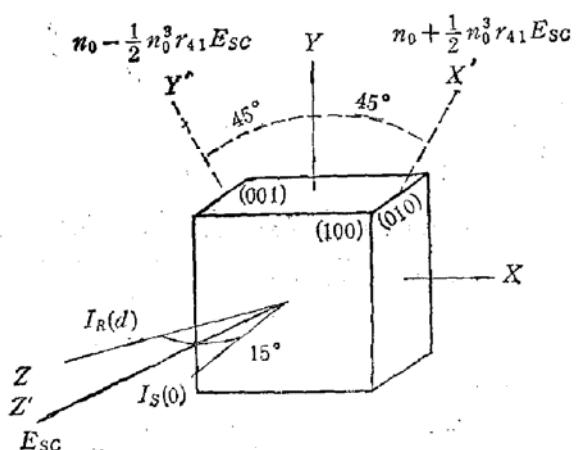


图 1 在 GaAs 双光束耦合中产生线性电光效应的几何配置图, 同时标出了新光轴、新主折射率和空间电荷电场

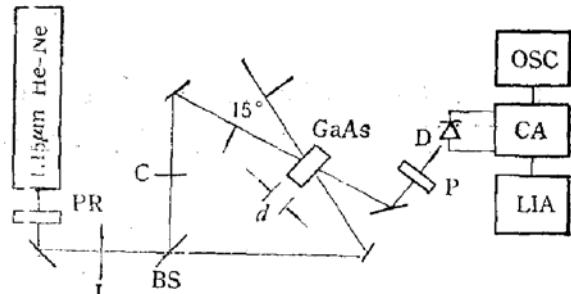


图 2 相对传播的双光束耦合实验装置图

三、实验装置

图 2 给出了双光束耦合和测量光束偏振面旋转角的实验装置示意图, 由 He-Ne 激光器得到 $1.15\mu\text{m}$ 的红外光, 偏振面旋转器 PR 可以得到偏振面沿 $\langle 001 \rangle$ 晶向, 并垂直于入射平面的线偏振光, 通过焦距为 1m 的透镜 L 和 10% 的分束片 BS 后, 分别得到参

考光束 $I_R(0)$ 和信号光束 $I_s(0)$, 以夹角 $2\theta = 165^\circ$ 从 GaAs 样品的一对(100)晶面相对射入, 由斩波器 C 调制的信号光束经 GaAs 晶体和可旋转的格兰棱镜 P 后, 为 Ge 光电二极管 D、电流放大器 CA 和锁定放大器 LIA 所接收。转动格兰棱镜 P 可以得到在不同方位的透射光强测量值, 并由此估算光束偏振面的旋转角。

双光束耦合过程中由两束光在晶体内的干涉而产生的光栅常数 $\Lambda \left(= \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \right)$ 为

$0.58 \mu\text{m}$, GaAs 样品按图 1 定向切割, 经研磨和抛光后样品厚度 $d = 4\text{mm}$, 掺 Cr 的 GaAs 样品电阻率 $\rho = 2.2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 迁移率 $\mu = 4830 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 图 3 给出了用 UV-365 分光光谱仪测量掺 Cr 的 GaAs 在近红外波段的透射率, 按透射率公式

$$I_T/I_0 = (1 - R)^2 e^{-\alpha d}$$

其中 I_0 是入射光强, I_T 是经过样品后的透射光强, $R = (n-1)^2/(n+1)^2$ 是样品表面的反射系数, n 是样品的折射率, 对 GaAs 在 $1.15 \mu\text{m}$ 时 $n \approx 3.43$, 我们可以计算得

到 $1.15 \mu\text{m}$ 时红外吸收系数 $\alpha = 1.47 \text{cm}^{-1}$.

图 3 GaAs:Cr 在室温时测量的近红外波段的透射光谱, 其中 I_T/I_0 是透射率, λ 是红外波长

四、结果与讨论

在双光束耦合过程中, 会发生参考光束向信号光束的能量转移, 而使信号光强通过晶体时获得增益, 在包括了同时存在的体吸收损耗后, 经过晶体样品的透射信号光强可表示为^[6]:

$$I_s(d) = \frac{I_0 \beta_0}{1 + \beta_0 \exp(\Gamma d)} \exp(\Gamma - \alpha)d \quad (1)$$

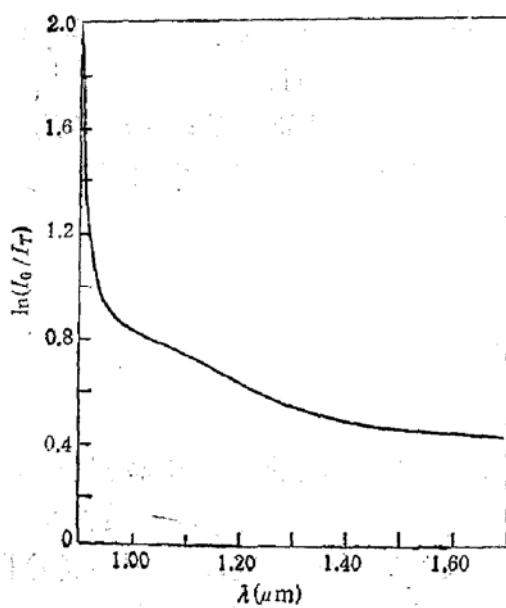
其中 $I_0 = I_R(0) + I_s(0)$ 是两束入射光的总光强, $\beta_0 = I_s(0)/I_R(0)$ 是两束光强之比, Γ 是增益系数和 α 是吸收系数。在单光束通过晶体样品时, 光强只因吸收而衰减, 故单光束过程中透射的信号光强为

$$I'_s(d) = I_s(0) \exp(-\alpha d) \quad (2)$$

通常增益是通过测量有效增益而得到, 按有效增益 γ 的定义^[7]

$$\gamma = \frac{I_s(d) \text{(有参考光束存在的耦合情况)}}{I'_s(d) \text{(无参考光束存在的单光束情况)}}$$

因此, 利用公式(1)和(2)代入有效增益定义后, 可以得到有效增益 γ 和增益系数 Γ 的关系式为:



$$\gamma = \frac{(1 + \beta_0) \exp(\Gamma d)}{1 + \beta_0 \exp(\Gamma d)} \quad (3)$$

由公式(3)可以看出有效增益的表达式和晶体材料的吸收与表面反射等因素无关, 因此, 实验上常常是进行有效增益 γ 的测量。

在实验测量中可设置检偏棱镜 P 的光轴与入射信号光束偏振方向间的夹角为 $90^\circ \pm \phi$, 如图 4 所示, 分别得到相应的有效增益为:

$$[\gamma_+(\phi)]^{1/2} = \frac{E_0 \sin(\phi + \psi)}{E_i \sin \phi} \quad (4)$$

和

$$[\gamma_-(\phi)]^{1/2} = \frac{E_0 \sin(\phi - \psi)}{E_i \sin \phi} \quad (5)$$

其中 E_0 和 E_i 分别是双光束耦合过程中信号光束的透射光和入射光的电场矢量, ψ 是经过样品后透射的信号光束偏振面的旋转角, 公式(4)与(5)经三角公式变换后, 可以解得旋转角的表示式为:

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{1 - \left[\frac{\gamma_-(\phi)}{\gamma_+(\phi)} \right]^{1/2}}{1 + \left[\frac{\gamma_-(\phi)}{\gamma_+(\phi)} \right]^{1/2}} \tan \phi \right\} \quad (6)$$

当 $\phi = 45^\circ$ 时, 即棱镜 P 的光轴方向分别和晶体中因双光束耦合而感生的新光轴 X' 和 Y' 相重合时, 并利用了以下的关系式:

设

$$\left[\frac{\gamma_-(\phi)}{\gamma_+(\phi)} \right]^{1/2} = \tan \varphi$$

得

$$\frac{1 - \tan \varphi}{1 + \tan \varphi} = \tan(45^\circ - \varphi)$$

和

$$\tan(\phi = 45^\circ) = 1$$

可以得到

$$\phi = 45^\circ - \tan^{-1} \left[\frac{\gamma_-(\phi = 45^\circ)}{\gamma_+(\phi = 45^\circ)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

图 5 给出了检偏棱镜的光轴位置和 GaAs 晶体中由于双光束耦合过程而感生的新光轴 X' 和 Y' 分别重合, 即 $\phi = 45^\circ$ 时, 实验测量得到的信号光束的有效增益 $\gamma_{\pm}(\phi = 45^\circ)$ 与两束光强比 β_0 的变化规律, 从测量结果可以看出随着 β_0 的减小, 有效增益 $\gamma_{\pm}(\phi = 45^\circ)$ 分别偏离为 1 的数值。其中 $\gamma_+(\phi = 45^\circ) > 1$ 说明信号光束的光强或电矢量在 X' 的分量经光折变晶体后获得增益, 反之, $\gamma_-(\phi = 45^\circ) < 1$ 说明在 Y' 的分量则经历衰减, 由于沿 x' 和 y' 两个分量在光折变晶体中分别通过慢轴和快轴传播, 其传播速度不等, 使得经过晶体后两分量之间附加产生了位相差, 并导致光束偏振面的旋转。由于该偏振面旋转角很小, 从实验上难以直接测量, 但可以利用有效增益的测量数据代入公式(7)后, 估算由于双光束耦合引起信号光束经过 GaAs 晶体后偏振面的旋转角 ψ , 其结果如图 6 所示, 偏振面旋转角随两束光强比的减小而增加显示了双光束耦合过程中电光效应和两束光之间能量转移的增强, 这与 KNbO₃ 铁电晶体中增益系数 Γ 随两束光强比 β_0 的减小而增强

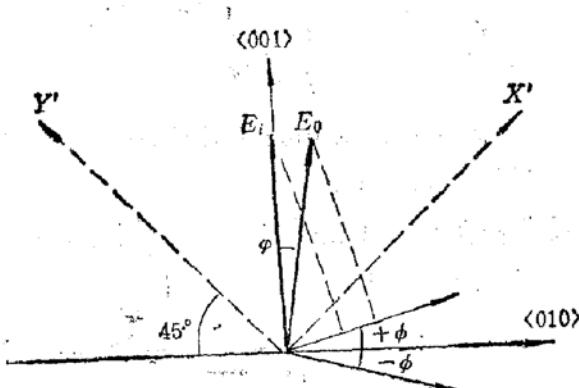


图 4 透射信号光束偏振面旋转的示意图，并给出了旋转角
 ϕ 和棱镜设置方位角 θ 的规定

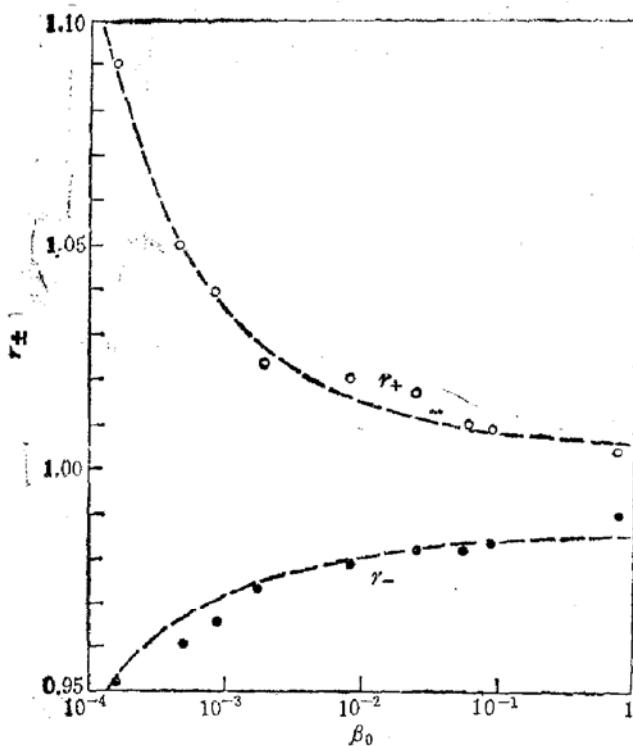


图 5 在 $\phi = 45^\circ$ 时，实验测量得到的有效增益 $\gamma_{\pm}(\phi)$ 与两束光强比 β_0 的关系

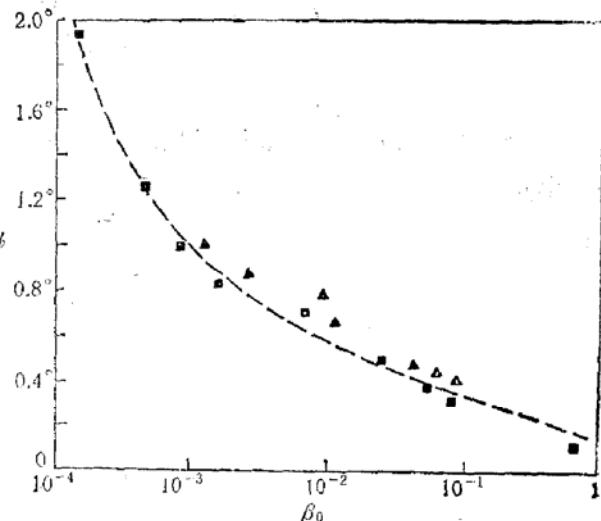


图 6 实验测量的透射信号光偏振面旋转角 ϕ 与两束光强比 β_0 的关系。其中 ■ 是由 $\phi = 45^\circ$ 时测得的结果，▲ 是由 $\phi = 20^\circ$ 时测得的结果

的实验规律相一致^[6]。为了提高测量的精度，我们也进行了 $\phi = 20^\circ$ 的测量，并按公式(6)得到偏振面旋转角的数值，从图 6 可以看出设置检偏棱镜 ϕ 角为不同值时，得出的偏振面旋转角的实验点均符合得较好。无疑地，为了进一步增强双光束耦合过程中光束偏振面旋转的实验现象，可以利用最佳的几何配置、或采用移动光栅法和外加偏置高电场法以提高耦合增益，从而获得更为明显的实验效果。

本工作中的 GaAs 样品由北京有色金属研究院提供，戴长虹同志在工作中曾给予帮助，作者在此表示深切的谢意。

參 考 文 獻

- [1] M. B. Klein, *Opt. Lett.*, 9, 350(1984).
- [2] A. M. Glass et al., *Phys. Lett.*, 44, 948(1984).
- [3] J. Strait and A. M. Glass, *J. Opt. Soc. Am.*, B3, 342(1986).
- [4] B. Cleraud, *J. Phys. C*, 18, 3615(1985).
- [5] S. Namba, *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 76(1961). (英語譯文)
- [6] P. Gunter, *Phys. Rep.*, 93, 199(1982). (英語譯文)
- [7] A. Marrakchi, J. P. Huignard and P. Gunter, *Appl. Phys.*, 24, 131(1981).

對變頻場火晶頭實驗室中兩束光的傳播特性。ATR(全反射散射)方法測量對
象一、二類兩束光的傳播特性。測量結果表明，兩束光的傳播方向由對變頻
場火晶頭的傳播方向與對象一、二類兩束光的傳播方向相反。

Pockels Effect in GaAs caused by Two-beam Coupling

王威禮、何雪華、唐慶蘭和張惠義

WANG Weili, HE Xuehua, RANG Qinglan and ZHANG Heyi

(Department of Physics, Peking University)

對變頻場火晶頭實驗室中兩束光的傳播特性。ATR(全反射散射)方法測量對
象一、二類兩束光的傳播特性。測量結果表明，兩束光的傳播方向由對變頻
場火晶頭的傳播方向與對象一、二類兩束光的傳播方向相反。

Abstract

We present experimental investigations on the two counterpropagation beam coupling in GaAs crystal using a $1.15\mu\text{m}$ infrared He-Ne laser. The rotation angles of polarization for transmitted beam are measured as a function of the two beam intensity ratio. The phenomena are thought to be linear electro-optic effect (Pockels' effect) caused by induced space charge field.

KEY WORDS: GaAs, Optical coupling, Pockels' effect

置 著 雜 著

根據各項研究結果，對變頻場火晶頭實驗室中兩束光的傳播特性進行了研究。