

光折变晶体中四波混频中间段 强度特性的研究*

吉选芒 王金来

(山西运城高等专科学校物理系, 运城 044000)

刘劲松 安毓英

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

摘 要 对 Ce·KNSBN 晶体四波混频相位共轭中间段的强度特性进行了实验研究。建立了在弱后向抽运小信号条件下的理论公式, 并进行了分析。实验结果与理论曲线趋势相一致。

关键词 光折变晶体, 四波混频, 强度特性。

1 引 言

在光折变非线性光学中, 简并四波混频相位共轭是一种基本的光折变效应。许多文献对其特性作了报道^[1-6]。迄今为止, 人们在处理四波混频问题时, 很少去考虑相位共轭反射率与总光强的关系。但从我们近来的实验中发现, 象两波耦合一样, 四波混频对总光强有明显的依赖特性。一般来说, 在四波混频中, 相位共轭反射率是入射到晶体上总光强的函数。当总光强太弱, 热激发影响使得光折变效应难以观测, 相位共轭反射率几乎为零时, 称之为截止段。随着总光强的增加, 热激发影响逐渐减小, 相位共轭反射率逐渐增强, 光折变效应变得明显可测, 这时称为中间段。总光强足够强以后, 热激发影响可忽略, 相位共轭反射率达到饱和, 不再随总光强而变化, 称此为饱和段。本文报道用 Ce·KNSBN 晶体进行四波混频相位共轭强度特性的研究结果。

2 理 论

四波混频相位共轭的原理图示于图 1。三束光同时入射到光折变晶体上, I_1 是前向抽运光, I_2 是后向抽运光, I_4 是入射信号光。其中 I_1 和 I_4 在晶体中进行两波耦合, 在晶体中写入动态相位栅。 I_2 沿着 I_1 的反方向入射到晶体上, 由 I_1 和 I_4 写入的相位栅将 I_2 衍射成第四束光 I_3 , 它沿着 I_4 的反方向传播, 是信号光 I_4 的相位共轭光。

下面讨论以透射光栅为主的四波混频, 即认为由抽运光 I_1 和信号光 I_4 在晶体中产生的相

* 国防科技预研基金和山西省教委科技开发项目资助课题。

收稿日期: 1999-03-10; 收到修改稿日期: 1999-06-04

位栅。在公式推导中下标 1 ~ 4 分别代表前向抽运光、后向抽运光、共轭光和信号光。光折变晶体的简并四波混频方程为^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta \frac{dA_1}{dZ} &= -\frac{\gamma}{I_0} A_4 (A_1 A_4^* + A_3 A_2^*) - \frac{1}{2} \alpha A_1, \\ \cos\theta \frac{dA_2^*}{dZ} &= -\frac{\gamma}{I_0} A_3^* (A_4^* A_1 + A_2^* A_3) + \frac{1}{2} \alpha A_2^*, \\ \cos\theta \frac{dA_3}{dZ} &= \frac{\gamma}{I_0} A_2 (A_1 A_4^* + A_3 A_2^*) + \frac{1}{2} \alpha A_3, \\ \cos\theta \frac{dA_4^*}{dZ} &= \frac{\gamma}{I_0} A_1^* (A_4^* A_1 + A_2^* A_3) - \frac{1}{2} \alpha A_4^* \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

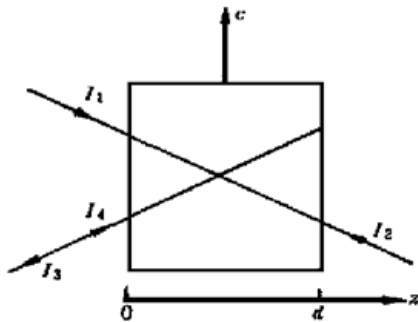


Fig. 1 A diagram of four-wave mixing phase conjugation configuration

其中 $I_0 = |A_1(z)|^2 + |A_2(z)|^2 + |A_3(z)|^2 + |A_4(z)|^2$ 为晶体内的平均光强, 2θ 是抽运光 1 与信号光 4 入射到晶体内的夹角, α 是晶体的吸收系数, γ 是简并四波混频复耦合系数。采用 Ja^[7] 关于中间段两波耦合系数修正式, 可以将 γ 表示为:

$$\gamma = \frac{\gamma_s}{1 + I_s/I_0}, \quad (2)$$

其中 γ_s 为饱和段耦合常数, $I_s = \beta/s$ 称为饱和强度。 β 为热激发速率, s 为光电离常数。

四波混频相位共轭反射率公式, 即使在饱和段, 也只能得到形式上的大信号解^[2]。在中间段, 问题变得更加复杂, 即使想获得形式上的大信号解析解也很难。下面, 采用饱和段相位共轭小信号公式的推导办法来推导中间段小信号公式。

在小信号近似条件下, 抽运光束未耗尽, 这就是说 $I_1, I_2 \gg I_3, I_4$ 。(1) 式中的 $A_3 A_3^*$ 、 $A_4 A_4^*$ 项可忽略。于是(1) 式可进一步简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_1}{dr} &= -\frac{1}{2} \alpha A_1, \\ \frac{dA_2}{dr} &= \frac{1}{2} \alpha A_2, \\ \frac{dA_3}{dr} &= \frac{\gamma}{I_0} A_2 (A_1 A_4^* + A_3 A_2^*) + \frac{1}{2} \alpha A_3, \\ \frac{dA_4^*}{dr} &= \frac{\gamma}{I_0} A_1^* (A_4^* A_1 + A_2^* A_3) - \frac{1}{2} \alpha A_4^*, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 $r = z/\cos\theta$ 为相互作用距离的量度。(3) 式的前两个方程可直接积分。

$$\begin{aligned} A_1 &= A_1(0) \exp(-\alpha r/2), \\ A_2 &= A_2(d) \exp[\alpha(r-d)/2], \\ I_0(r) &= I_1(0) \exp(-\alpha r) + I_2(d) \exp[\alpha(r-d)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Petersen^[5] 在求解大信号近似解析解时, 采用了弱后向抽运近似的方法。下面采用类似的方法, 在小信号近似的基础上, 进一步假定后向抽运光 $I_2(d)$ 远比前向抽运光 $I_1(0)$ 弱, 以及 γ_s 为实数。即在条件 $I_1(0) \gg I_2(d)$ 、 $I_1(0) \gg I_4(0)$ 条件下, 可略去(3) 式后两式中的 $A_2^* A_3$ 项, 并可略去(4) 式中的 $I_2(d) \exp[\alpha(r-d)]$ 项, 使得 $I_0(r) \approx I_1(0) \exp(-\alpha r)$ 。这时(3) 式中后两式可变为

$$\frac{dA_3}{dr} = \frac{\gamma_s}{I_1(0) \exp(-\alpha r) + I_s} A_1(0) A_2(d) \exp(-\alpha d/2) A_4^*(r) + \frac{1}{2} \alpha A_3, \quad (5a)$$

$$\frac{dA_4}{dr} = \left[\frac{\gamma_s I_1(0) \exp(-\alpha r)}{I_1(0) \exp(-\alpha r) + I_s} - \frac{1}{2} \alpha \right] A_4. \quad (5b)$$

(5b) 式的解为

$$A_4(r) = A_4(0) \left[\frac{I_1(0) + I_s}{I_1(0) \exp(-\alpha r) + I_s} \right]^{\gamma_s/\alpha} \exp(-\alpha r/2) \quad (6)$$

将(6)式代入(5a)式中, 在 $A_3(d) = 0$ 的边界条件下可求出

$$A_3(r) = A_4^*(0) \frac{A_1(0) A_2(d)}{I_1(0)} [I_1(0) + I_s]^{\gamma_s/\alpha} \{ [I_1(0) \exp(-\alpha r) + I_s]^{-\gamma_s/\alpha} - [I_1(0) \exp(-\alpha d) + I_s]^{-\gamma_s/\alpha} \} \exp[\alpha(r-d)/2]. \quad (7)$$

由(7)式可得相位共轭振幅反射率公式为

$$\rho = \frac{A_3(0)}{A_4^*(0)} = - \exp(-\alpha d/2) \frac{A_1(0) A_2(d)}{I_1(0)} \left\{ \left[\frac{I_1(0) + I_s}{I_1(0) \exp(-\alpha d) + I_s} \right]^{\gamma_s/\alpha} - 1 \right\}. \quad (8)$$

在 γ_s 为实数时, 相应的强度公式为

$$R = \rho \cdot \rho^* = \exp(-\alpha d) q \left\{ \left[\frac{I_0 + I_s}{I_0 \exp(-\alpha d) + I_s} \right]^{\gamma_s/\alpha} - 1 \right\}^2, \quad (9)$$

其中, $q = I_2(d)/I_1(0)$ 为后向抽运光与前向抽运光强度比。在(9)式推导过程中, 已经采用了 $I_4(0)$ 和 $I_2(d)$ 都很小的近似。 $I_0 = I_1(0) + I_4(0) + I_2(d) \approx I_1(0)$ 为入射到晶体上的总光强。

3 理论分析

从(9)式可看到, 当总光强足够强时, 在饱和段, 其饱和强度 I_s 与总光强 I_0 相比可忽略, 可得出饱和段相位共轭反射率公式

$$R = \exp(-\alpha d) q [\exp(\gamma_s d) - 1]^2. \quad (10)$$

由(10)式看出, 在饱和段, R 与 I_0 无关。它不是总光强 I_0 的函数。但在中间段, 由(9)式可以看出, 除 I_s 外, 还有 $I_0, \gamma_s, \alpha, q, d$ 五个变量与 R 有关。

图2和图3给出了根据(9)式计算出来的 R 的变化规律, 它们以 I_s 为参变量, 分别以 I_0, γ_s 为自变量。

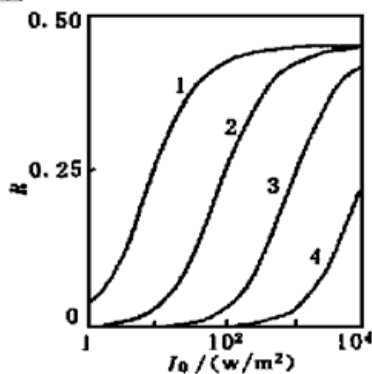


Fig. 2 The dependence of the phase conjugate intensity reflectivity R on the total incident intensity I_0 . $\gamma_s = 1.5 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$, $q = 0.1$, $d = 1 \text{ cm}$, I_s : 1: 1 W/cm^2 , 2: 10 W/cm^2 , 3: 10^2 W/cm^2 , 4: 10^3 W/m^2 .

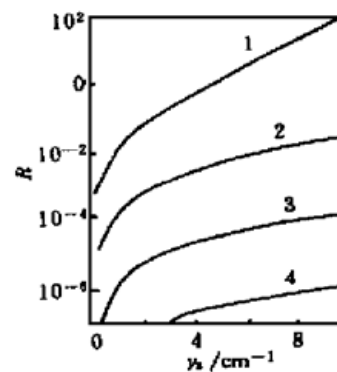


Fig. 3 The dependence of the phase conjugate intensity reflectivity R on the saturation coupling coefficient γ_s . $\alpha = 1 \text{ cm}^{-1}$, $d = 1 \text{ cm}^{-1}$, $q = 0.1$, I_s/I_0 : 1: 1, 2: 10, 3: 10^2 , 4: 10^3

图 2 给出了 R 随 I_0 从 1 到 10^4 W/m^2 的变化曲线。可见, R 随 I_0 明显呈现出了截止段, 中间段到饱和段的变化特征。 I_s 越大, 截止段越长, 饱和段到来得越晚。当 $I_s = 0$ 时, 这种变化特征消失, R 不随 I_0 而变化, 这正是饱和段的特征。

图 3 给出了 γ_s 从 0.1 cm^{-1} 到 10 cm^{-1} 的变化曲线。从图 3 可看出, R 随 γ_s 呈现出了从增加到饱和的变化特征。 I_s 越大, 饱和得越晚。对于同样的 γ_s , I_s/I_0 越小, R 则越大。所以, 在中间段, 通过外加电场改变晶体温度等技术提高 γ_s , 显得比饱和段更为重要。

4 实验研究

图 4 是四波混频相位共轭实验装置图, He-Ne 激光器发出 632.8 nm 的基模高斯光束, 入射到中性密度滤波器 ND 上, 由其控制入射总光强 I_0 。光束经分束镜 $BS_1 \sim BS_3$ 、全反射镜 $M_1 \sim M_3$ 分束, 反射后成为到达晶体上的入射信号光 $I_4(0)$, 前向入射抽运光 $I_1(0)$, 后向入射抽运光 $I_2(d)$ 。利用中性密度滤波器调节总入射光强 I_0 。我们测量了 Ce·KNSBN 晶体在弱后向抽运小信号条件下的四波混频相位共轭反射率 R 随 I_0 的变化关系。晶体尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 通光方向厚度 $d = 5 \text{ mm}$ 。 $I_1(0)$ 和 $I_4(0)$ 在空气中的夹角为 16° 。光束的横截面积均为 0.015 cm^2 。

在透射光栅弱后向抽运小信号的条件, 将总入射光强 I_0 从微弱调节到将近 3000 W/m^2 , 保持 $\rho = I_4(0)/[I_1(0) + I_2(d)] = 0.05$, $q = I_2(d)/I_1(0) = 0.1$ 不变, 通过测量 $I_4'(0)$ 和 $I_3'(0)$, 经过换算即可得出 R 随 I_0 变化的实验点, 如图 5 中的黑圆点所示。由实验结果可看出, 实验结果和理论曲线变化的趋势相一致。测量结果变化也呈现出由截止段、中间段到饱和段的变化特征。

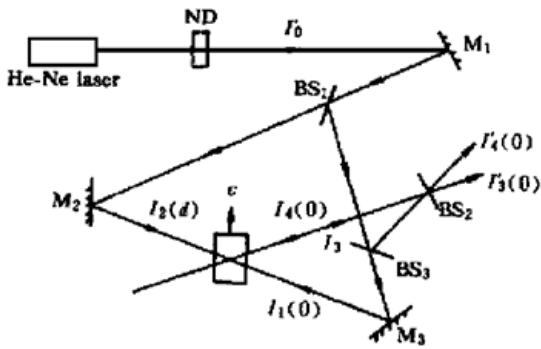


Fig. 4 Experimental setup for studying the intensity dependence of four-wave mixing phase conjugate configuration with a Ce·KNSBN crystal

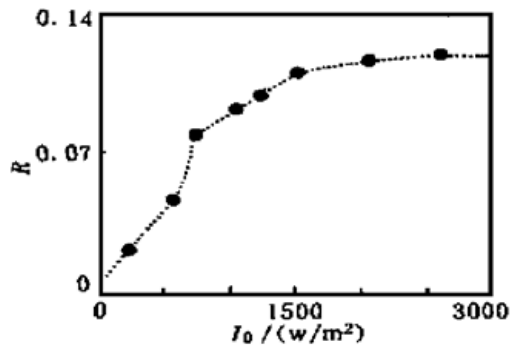


Fig. 5 Experimental phase conjugate intensity reflectivity R as a function of total incident intensity I_0 .

结 论 利用弱后向抽运小信号近似条件, 推出了四波混频相位共轭中间段相位共轭反射率 R 的解析式。通过理论分析和实验研究表明。在中间段, 这种近似是合理的。

结合以上理论分析和实验结果可得出:

1) (9) 式是考虑弱后向抽运小信号近似条件下推出的。这一解析式可以定性说明四波混频相位共轭反射率 R 的强度特性。 R 随 I_0 关系呈现出截止、增加到饱和的变化特征。

2) 对 R 与材料参数 γ_s 之间关系的理论分析表明, 可通过外加电场或改变温度, 提高 γ_s 来增加相位共轭反射率 R 。

参 考 文 献

- [1] Aleksander Bledowski, Wieslaw Krolikowski. Exact solution of degenerate four-wave mixing in photorefractive media. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 45~ 46
- [2] Croin-Golomb M, Fischer B, White J O *et al.*. Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(1): 12~ 20
- [3] Cronin-Golomb M, White J O, Fischer B *et al.*. Exact solution of a nonlinear model of four-wave mixing and phase conjugation. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(7): 313~ 315
- [4] 刘思敏, 郭儒, 凌振芳. 光折变非线性光学. 北京: 中国标准出版社, 1992. 78~ 91
- [5] Petersen P M, Johansen P M. Simple theory for degenerate four-wave mixing in photorefractive media. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1): 45~ 46
- [6] Goltz J, Denz C, Klumb H *et al.*. Four-wave mixing in photorefractive crystals with depleted pumps. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(4): 321~ 323
- [7] Ja Y H. Intensity dependence of stationary energy transfer in degenerate two-wave mixing in a reflection geometry with photorefractive crystals. *Opt. and Quant. Electron.*, 1985, **17**(4): 291~ 295

Intensity Dependence of Four-Wave Mixing at Intermediate Region in Photorefractive Crystals

Ji Xuanmang Wan Jinlai

(Department of Physics, Yuncheng Advanced Training College, Yuncheng 044000)

Liu Jinsong An Yuying

(Applied Physics Department, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 10 March 1999; revised 4 June 1999)

Abstract The four-wave mixing at intermediate region in Ce:KNSBN crystal was studied experimentally as a function of intensity. A theory has been built up under undepleted pump approximation. The experimental results using Ce:KNSBN crystal are in good agreement with the theory qualitatively.

Key words photorefractive crystal, four-wave mixing, intensity dependence.