

# 光折变两波耦合对光扇开效应的抑制作用

王立军 过己吉 汪家友

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

**摘 要** 以多个两波耦合(TWM)相位栅模型建立了考虑光扇开效应后的动态两波耦合方程。通过数值求解揭示了在大信号下两波耦合对光扇开效应的抑制作用和小信号下光束扇开损耗对两波耦合影响的规律, 并进行了相应的实验研究。

**关键词** 光扇开效应, 光折变两波耦合, 体相位栅。

## 1 引 言

当一束激光入射到光折变晶体时, 由于入射光与晶体中的前向散射光之间的光耦合, 会形成具有一定空间分布的、被放大的扇形散射光<sup>[1]</sup>, 这就是光折变晶体特有的光扇开效应。正是利用这种扇开效应形成的散射种子光, 人们实现了各种形式的光折变相位共轭器<sup>[2]</sup>。在两波耦合过程中, 同样存在着泵浦光和信号光的自身扇开效应, 但在稳态的两波耦合理论<sup>[3]</sup>中则完全忽略了光扇开的影响, 其原因被定性地归结为两波耦合体相位栅处于能量竞争优势, 从而抑制了作用光束沿其它方位的光扇开, 但尚未见到定量的理论分析的报告。

本文建立了考虑光扇开效应后的动态两波耦合方程。通过数值求解考察了扇开光和信号光的建立过程, 定量地分析了两波耦合对光扇开效应的抑制作用以及光扇开损耗对两波耦合影响的规律。最后通过实验证实了两波耦合对光扇开效应的抑制作用。

## 2 动态两波耦合和光扇开效应方程

图 1(a)所示为多个两波耦合(TWM)示意图,  $A_1$  和  $A_2$  分别是泵浦光和信号光振幅,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  是其对应的方位角,  $0-l$  是作用区长度,  $c$  是晶体光轴。由于光扇开效应, 除了入射泵浦光和信号光之间的能量耦合外, 它们各自都要发生光致光散射。因为初始散射光与入射光强成正比, 而一般情况下信号光远小于泵浦光, 所以可忽略信号光的扇开效应, 只考虑泵浦光的自扇开。多个两波耦合相位栅波矢  $K$  和泵浦光的扇开噪音栅波矢  $K_n$  如图 1(b)所示。其中  $K_1$  和  $K_2$  分别表示泵浦光和信号光的波矢。

以图 1(b)所示的多个相位栅模型, 只考虑泵浦光与信号光, 泵浦光与其扇开光之间的能量耦合(忽略信号光与扇开光以及扇开光之间的能量耦合), 根据 Kukhtarev 方程组<sup>[4]</sup>可得到如下的包含泵浦光扇开的动态两波耦合方程组

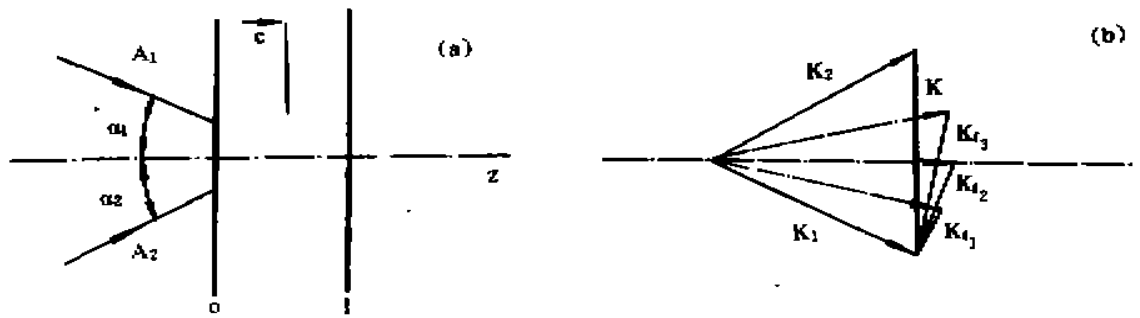


Fig. 1 (a) Schematic drawing of TWM, (b) schematic drawing of wave vector of TWM and the fanning grating

$$\cos \alpha_1 \frac{\partial A_1(z, t)}{\partial z} = g(z, t) A_2(z, t) + \sum_{i=1}^n g_i(z, t) A_{\beta_i}(z, t) - \frac{\alpha}{2} A_1(z, t) \quad (1)$$

$$\cos \alpha_2 \frac{\partial A_2^*(z, t)}{\partial z} = g(z, t) A_1^*(z, t) - \frac{\alpha}{2} A_2^*(z, t) \quad (2)$$

$$\cos \beta_i \frac{\partial A_{\beta_i}^*(z, t)}{\partial z} = g_i(z, t) A_1^*(z, t) - \frac{\alpha}{2} A_{\beta_i}^*(z, t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial g(z, t)}{\partial t} + \frac{g(z, t)}{\tau} = \frac{\gamma}{\tau} \frac{A_1(z, t) A_2^*(z, t)}{I_0}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial g_i(z, t)}{\partial t} + \frac{g_i(z, t)}{\tau} = \frac{\gamma}{\tau} \frac{A_1(z, t) A_{\beta_i}^*(z, t)}{I_0} \quad (5)$$

其中

$$I_0 = |A_1|^2 + |A_2|^2, \quad g(z, t) = -i \frac{n_0^2 \omega \gamma_{\text{eff}} E_{\text{sc}}(z, t)}{2c},$$

$\beta_i$  为扇开光  $i (i = 1, \dots, n)$  的方位角,  $\gamma$  为耦合系数,  $\tau$  为时间常数,  $\alpha$  是吸收系数,  $g(z, t)$  和  $g_i(z, t)$  分别为多个两波耦合相位栅振幅和扇开噪音栅振幅,  $\gamma_{\text{eff}}$  是有效电光系数,  $E_{\text{sc}}(z, t)$  是空间电荷场,  $\omega$  是光频率,  $n_0$  是晶体折射率。

由于光折变晶体的慢响应特性, 在响应时间范围内的每个短间隔内相位栅呈准静态, 在这里关心的是光折变整个作用过程的时间特性。对非局域响应介质 ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{KNSBN}$ ), 耦合系数为实数, 光束之间只有能量耦合,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_{\beta_i}$ 、 $g$  和  $g_i$  等都为实数。

设泵浦光在  $\beta_i$  方位的初始散射系数满足瑞利散射定律<sup>[5]</sup>, 即

$$e_i = e_0 \cos^2(\alpha_1 - \beta_i) \quad (6)$$

并取  $e_0 = 10^{-8}$  量级<sup>[6]</sup>和  $\alpha = 0.86/\text{cm}$ 。

方程(1)~(4)是二阶双曲型偏微分方程组, 相应的初始条件和边界条件为

$$\left. \begin{aligned} A_1(0, t) &= A_{10}, & A_2(0, t) &= A_{20}, & A_{\beta_i}(0, t) &= \sqrt{e_i} A_{10}, & (i = 1, 2, \dots, n) \\ A_1(z, 0) &= 0, & A_2(z, 0) &= 0, & A_{\beta_i}(z, 0) &= 0, & (i = 1, 2, \dots, n) \\ g(z, 0) &= 0, & g_i(z, 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可用有限差分法对其进行数值求解。

### 3 数值结果及分析

#### 3.1 两波耦合对光扇开效应的抑制作用

图 2(a)是在相同的耦合强度  $\gamma l = 3$  和初始散射系数  $e_0 = 10^{-8}$ 、不同光束比  $q (q = I_{10}/I_{20})$  下, 泵浦光的自由扇开和在多个两波耦合下的扇开光的建立过程的比较。图 2(a)中曲线 1 表示无信号光时, 泵浦光的扇开光的建立过程; 曲线 2、3、4 分别表示存在信号光和  $q = 10^3$ ,  $10^2$  和 10 时, 泵浦光的扇开光的建立过程。可见在有信号光时, 泵浦光的光扇开效应被有效

地抑制，并且入射信号光越强( $q$  越小)，多个两波耦合对泵浦光扇开的抑制作用越强。在  $q = 10$  时，多个两波耦合使泵浦光的扇开光强减小了约 10 倍。图 2(b)表示在相同的  $q$  和  $\epsilon_0$ ，但不同的  $\nu_l$  时的情况，曲线 1 和 2 分别是  $q = 100$  和  $\nu_l = 2.5$  情况下，没有和有信号光时泵浦光的扇开；3 和 4 分别表示在  $q = 100$  和  $\nu_l = 2$  的情况下，没有和有信号光时泵浦光的扇开。可见在  $q$  一定时， $\nu_l$  愈大，多个两波耦合对光扇开的抑制愈明显。

由(4)式可知，多个两波耦合相位栅建立的速率为

$$(\partial g / \partial t) = - (g - m r) / \tau, \quad m = A_1 A_2^* / I_0 \tag{7}$$

稳定后的栅位栅幅度  $g = m r$ ，即多个两波耦合相位栅的稳态值与光场调制度  $m$  及  $\nu_l$  成正比。大信号下多个两波耦合的作用光场的调制度远大于光扇开的光场调制度，因而多个两波耦合相位栅的稳态值  $g$  远大于光扇开相位栅  $g_0$ 。这样，由于信号光与扇开光能量竞争的结果，便有效地抑制了光扇开效应。

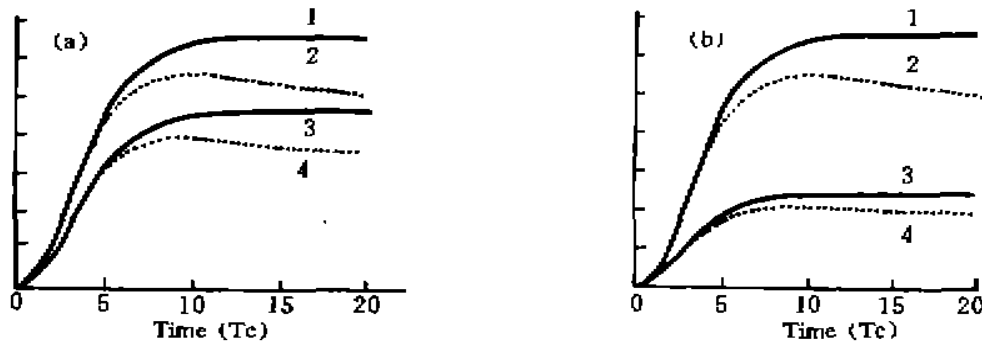


Fig. 2 The intensity of a fanning beam for the pump beam. (a) curves 1, 2, 3, 4 correspond to  $q = \infty$  (without signal),  $10^3$ ,  $10^2$  and  $10$  respectively, for all curves  $\epsilon_0 = 10^{-6}$ ,  $\nu_l = 3$ . (b) curves 1 and 2 correspond to  $\nu_l = 2.5$ ; curves 3 and 4 correspond to  $\nu_l = 2$ . for all curves  $\epsilon_0 = 10^{-6}$ ,  $q = 100$

### 3.2 泵浦光扇开效应对两波耦合的影响

图 3 表示弱信号下( $q$  达  $10^6$ )由于泵浦光扇开损耗对多个两波耦合信号光输出的影响。图 3(a)中曲线 1 和 3 对应没有考虑泵浦光扇开，曲线 2 和 4 对应考虑了泵浦光扇开(取  $\epsilon_0 = 10^{-8}$ )时信号光的输出，其中的曲线 1、2 对应  $\nu_l = 3$ ,  $q = 10^6$ ，曲线 3、4 对应  $\nu_l = 3$ ,  $q = 10^7$ 。可见在弱信号下，由于扇开效应使得信号光的稳态输出下降，这是由于在信号弱到和泵浦光的初始散射光相当时，多个两波耦合过程与泵浦光扇开相比竞争优势不明显，对其没有抑制作用；因而泵浦光总的扇开损耗使信号输出下降。图 3(b)表示  $q$  一定， $\nu_l$  不同时，泵浦光扇开影响作用的比较，曲线 1、2 对应  $\nu_l = 3$ ,  $q = 10^6$ ；曲线 3 和 4 对应  $\nu_l = 2.5$ ,  $q = 10^6$ 。可见  $\nu_l$

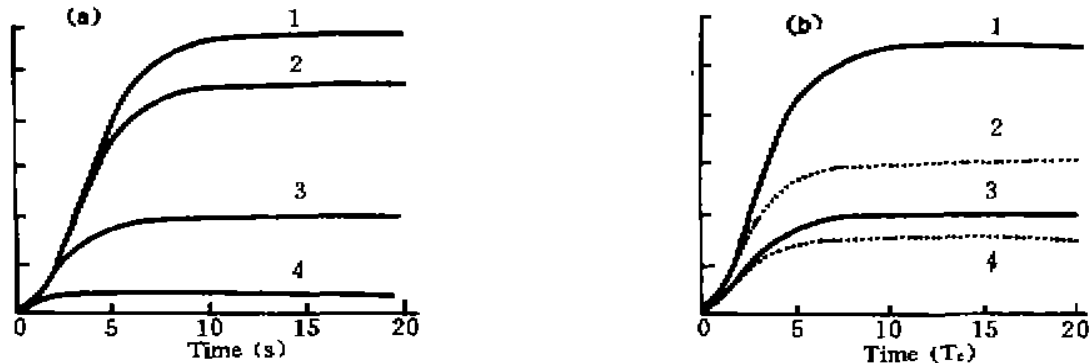


Fig. 3 The output of the signal in TWM: (a) curves 1 and 2 correspond to  $q = 10^6$ ,  $\nu_l = 3$ ; curves 3 and 4 correspond to  $q = 10^7$ ,  $\nu_l = 3$ , (b) curves 1 and 2 correspond to  $q = 10^6$ ,  $\nu_l = 3$ ; curves 3 and 4 correspond to  $q = 10^6$ ,  $\nu_l = 2.5$

越大，信号光输出下降越显著。这是由于在小信号下  $\mu$  越大，泵浦光扇开损耗越大的缘故。

图 4(a)分别给出  $\mu = 3, q = 10$  时纯两波耦合(实线)和考虑光扇开作用后(虚线)的信号光输出。可见在大信号下，泵浦光扇开损耗对信号光输出的影响很小，这是由于在大信号下泵浦光的扇开被有效地抑制的结果。图 4(b)表示在小信号下 ( $q = 10^6$ )，两波耦合对泵浦光扇开的抑制效果，可见在入射信号弱到接近泵浦光的初始散射种子光时，几乎没有这种抑制效果。因为此时两波耦合相位栅与扇开噪音栅相比优势不明显，所以对光扇开没有明显的抑制作用。

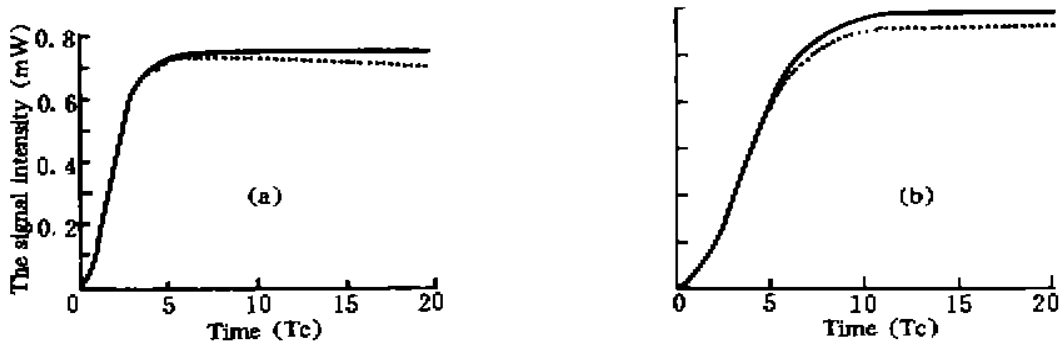


Fig. 4 (a) The output of the signal in TWM for large signal; (b) the intensigt of a fanning beam for the pump beam in TWM for small signal

### 4 实验和讨论

图 5 是多个两波耦合实验光路图， $Ar^+$  激光工作波长 488 nm， $TEM_{00}$  模输出，经  $\lambda/2$  玻片变成 e 光(相对光折变晶体而言) $L_1$  和  $L_2$  为准直透镜组，经分束器 BS 后分成信号光和泵浦光。 $M_1, M_2$  和  $M_3$  为反射镜。 $A_1$  和  $A_2$  是直径约为 1 mm 的光阑。在信号光光路中加衰减器 NF，可用来改变泵浦光和信号光的比值  $q$ 。信号光和泵浦光光程基本相等，夹角  $\theta$  约  $20^\circ$ 。 $D_1$  和  $D_2$  用来探测输出光信号，晶体由山东大学晶体材料研究所提供的  $Cu:KNSBN$ ，尺寸为  $5\text{ mm} \times 5.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。

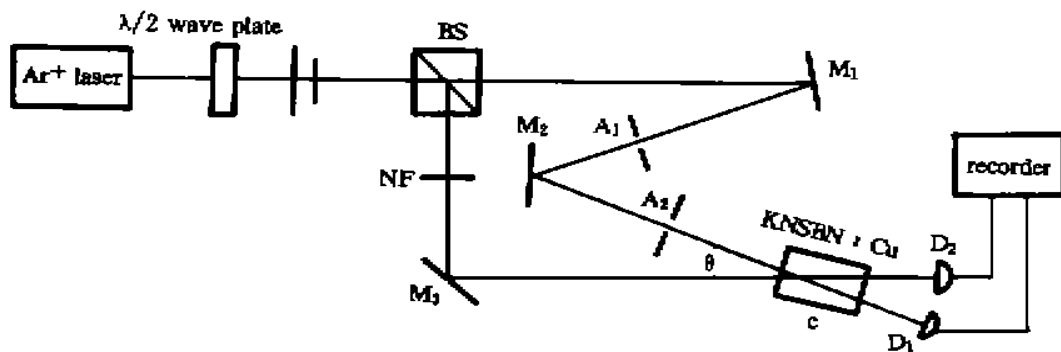


Fig. 5 Eexperimental setup of TWM,  $L_1, L_2$  — a set of lens, BS=beam splitter, NF—Attenuator,  $M_1, M_2$  and  $M_3$ —Mirrors,  $A_1$  and  $A_2$ —diaphragms,  $D_1$  and  $D_2$ —detectors

图 6 表示两波耦合时，多个两波耦合对泵浦光扇开的抑制结果，图 6(a)中曲线 3 是在挡住信号光时，强度为 1 mw 的泵浦光的输出曲线  $I_1(l, t)$ 。随着其扇开光的建立，泵浦光的输出呈指数下降。曲线 1 和 2 分别是  $q = 10$ ，总入射光强为 1.1 mw 时得到的多个两波耦合中泵浦光和信号光的输出  $I_1(l, t)$  和  $I_2(l, t)$ 。在曲线 1 中泵浦光的下降既包括耦合到信号光中的能量(曲线 2)，又包括泵浦光在其它方位总的扇开损耗和材料的吸收。令  $I_f(l, t) = I_1(l, 0) - I_1(l, t)$  和  $I_g(l, t) = I_1(l, 0) - I_1(l, t) - I_2(l, t)$ ，则  $I_f(l, t)$  和  $I_g(l, t)$  分别表示泵浦光自由

扇开(没有信号)和存在两波耦合(有信号光)时的总扇开光随时间的变化曲线(如图 6(b)所示)。可见,由于两波耦合的存在,一方面有效地抑制了泵浦光的扇开损耗,另一方面缩短了其扇开光的建立时间,这与前面的理论结果是相符的。

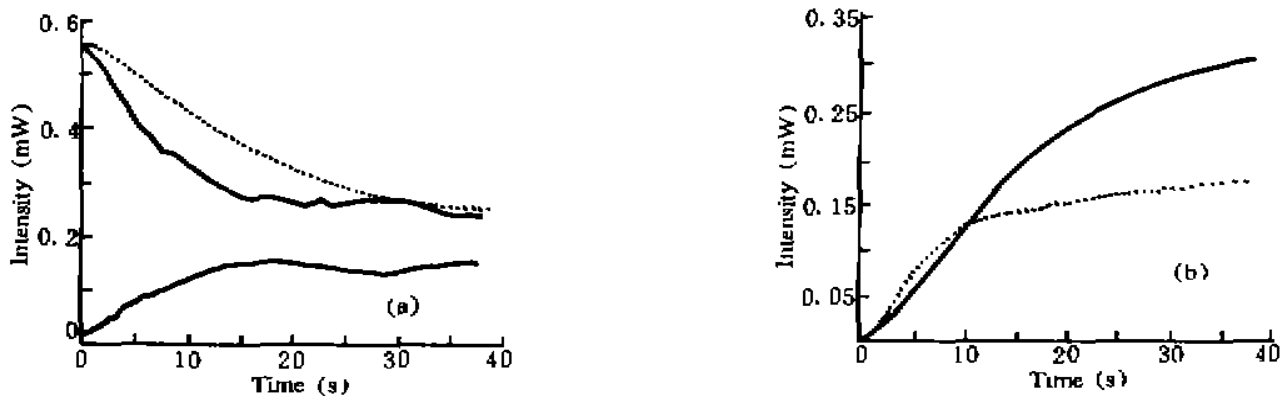


Fig. 6 The experimental curves of TWM

**结 论** 综上所述,在大信号下,两波耦合过程可有效地抑制作用光束自身的扇开效应,并且这种抑制作用随着信号光强度和晶体耦合强度的增大而增大。因此在大信号下泵浦光扇开对输出信号的影响不明显。在小信号下,两波耦合过程对泵浦光扇开几乎没有影响,因此光扇开损耗使信号光的稳态输出下降,晶体耦合强度愈大,下降愈显著。

### 参 考 文 献

- [1] P. Gunter, J. P. Huignard, Photorefractive materials and their applications, *Topic of Applied Physics*, (Springer-Verlag), 1987, 61: 27~33
- [2] S. Weiss, S. Sternklar, B. Fischer, Double phase-conjugate mirror; analysis, demonstration and applications, *Opt. Lett.*, 1987, 12(2): 114~116
- [3] P. Yeh, Two-wave mixing in nonlinear media, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-25(3): 484~519
- [4] N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov et al., Holographic storage in electro-optic crystals, beam coupling and light amplification, *Ferroelectrics*, 1979, 22: 961~964
- [5] M. Segev, Y. Ophir, B. Fischer, Nonlinear multi two-wave mixing, the fanning process and its bleaching in photorefractive media, *Opt. commun.*, 1990, 77(2, 3): 267
- [6] A. A. Zozulya, Fanning and photorefractive self-pumped fourwave mixing geometries, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, 20(2): 538~555

## Suppress Effect on the Beam Fanning in Photorefractive Two-Wave Mixing

Wang Lijun    Guo Siji    Wang Jiayou

(Department of Applied Physics, Xidian University, Xian 710071)

(Received 17 July 1995; revised 17 October 1995)

**Abstract** The dynamic equations of the photorefractive two wave mixing (TWM), which account on the beam fanning effect, are derived and solved by numerical method. The suppress effect of TWM upon the incident beam fanning in large signal is presented and the effect of the beam fanning on the output of the signal are discussed theoretically. Some relevant experimental investigation is conducted.

**Key words** fanning effect, photorefractive two-wave mixing, volume phase grating.