

光折变晶体中高速调制光简并四波混频特性的研究*

石顺祥 关义春 刘 娟 安毓英 过巳吉
(西安电子科技大学, 西安 710071)

提 要

本文对光折变晶体中高速调制光简并四波混频过程的特性进行了理论分析,给出了在 Ce:SBN 晶体中进行的实验结果;并指出,光折变晶体中的简并四波混频可应用于消空间畸变的时域编码通信和双向时域信息的传输、放大。

关键词: 光折变晶体, 高速调制光, 简并四波混频。

文献[1, 2]从理论和实验上证实了慢时间响应的光折变晶体可以传输高速时域调制光,从而可以将光折变晶体的应用扩大到时域信息处理范畴。文献[3]给出了描述光折变晶体中高速调制光简并四波混频过程的基本方程。本文将由该方程出发,对简并四波混频过程的特性进行深入讨论。

一、理 论

由描述光折变效应的 Kukhtarev 方程出发,可得图 1 所示结构、在只计透射光栅情况下,高速调制光在光折变晶体中进行简并四波混频过程的基本方程为^[3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_1(z, t)}{\partial z} &= (\Gamma_1 + i\Gamma_2) (\bar{m}/I_0) E_3(z, t), \\ \frac{\partial E_2(z, t)}{\partial z} &= (\Gamma_1 - i\Gamma_2) (\bar{m}^*/I_0) E_4(z, t), \\ \frac{\partial E_3(z, t)}{\partial z} &= -(\Gamma_1 - i\Gamma_2) (\bar{m}^*/I_0) E_1(z, t), \\ \frac{\partial E_4(z, t)}{\partial z} &= -(\Gamma_1 + i\Gamma_2) (\bar{m}/I_0) E_2(z, t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $(\Gamma_1 + i\Gamma_2)$ 是与晶体特性、光偏振、光入射方向有关的耦合系数,

$$I_0 = |E_{10}(t)|^2 + |E_{2L}(t)|^2 + |E_{30}(t)|^2 + |E_{4L}(t)|^2,$$

$$\bar{m} = \overline{E_1(z, t) E_3^*(z, t) + E_2^*(z, t) E_4(z, t)}.$$

分析表明,输入、输出光之间的关系可以通过 H 传输矩阵由下面形式表示

$$E_{out}(z, t) = H(z) E_{in}(t), \quad (2)$$

式中

$$E_{\text{out}}(z, t) = \begin{bmatrix} E_1(z, t) \\ E_2(z, t) \\ E_3(z, t) \\ E_4(z, t) \end{bmatrix}, E_{\text{in}}(t) = \begin{bmatrix} E_{1\text{in}}(t) \\ E_{2\text{in}}(t) \\ E_{3\text{in}}(t) \\ E_{4\text{in}}(t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$H(z) = \begin{bmatrix} H_{11}(z) & 0 & H_{13}(z) & 0 \\ 0 & H_{22}(z) & 0 & H_{24}(z) \\ H_{31}(z) & 0 & H_{33} & 0 \\ 0 & H_{42}(z) & 0 & H_{44}(z) \end{bmatrix},$$

在 $z=0$ 、 L 处的 H 矩阵分别为

$$H(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{22}(0) & 0 & H_{24}(0) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & H_{42}(0) & 0 & H_{44}(0) \end{bmatrix}, H(L) = \begin{bmatrix} H_{11}(L) & 0 & H_{13}(L) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ H_{31}(L) & 0 & H_{33}(L) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

它们可以描述高速调制光在光折变晶体中进行的各种结构简并四波混频过程的传输特性。对于诸如 BaTiO_3 , SBN 等以扩散机制为主的光折变晶体, 可视 $\Gamma_2=0$, 求解方程即得光折变晶体中的光场为

$$\left. \begin{aligned} E_1(z, t) &= [E_{10}(t)/2] [B_+(0)B_+(z) + B_-(0)B_-(z)] \\ &\quad + [E_{30}(t)/2] [-B_+(0)B_-(z) + B_-(0)B_+(z)], \\ E_2(z, t) &= [E_{2L}(t)/2] [B_+(L)B_+(z) + B_-(L)B_-(z)] \\ &\quad + [E_{4L}(t)/2] [B_-(L)B_+(z) - B_+(L)B_-(z)], \\ E_3(z, t) &= [E_{10}(t)/2] [B_+(0)B_-(z) - B_-(0)B_+(z)] \\ &\quad + [E_{30}(t)/2] [B_+(0)B_+(z) + B_-(0)B_-(z)], \\ E_4(z, t) &= [E_{2L}(t)/2] [B_+(L)B_-(z) - B_-(L)B_+(z)] \\ &\quad + [E_{4L}(t)/2] [B_+(L)B_+(z) + B_-(L)B_-(z)], \\ B_+(z) &= \sqrt{1 + \text{sech}[-(\Gamma_1/I_0)c_0z + c_1]}, \\ B_-(z) &= \sqrt{1 - \text{sech}[-(\Gamma_1/I_0)c_0z + c_1]}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用光折变晶体中高速调制光的简并四波混频过程, 可以实现双向高速振幅调制光的传输和放大, 即在图 1 结构中, 如果光 1、4(或 2、3)同时携带高速振幅调制信息, 则可同时实现向两个方向的高速振幅调制光的放大, 而携带的信息互不干扰, 其特性类似于在两个方向进行的双光束耦合, 所不同的是在简并四波混频这个四光子过程中, 沿两个方向传输的任一光的变化, 均会影响双向传输、放大特性。有关光折变晶体中高速调制光双光束耦合的传输、放大特性, 将在另一篇文章中详细论述, 此处不作进一步讨论。

光折变晶体中高速调制光简并四波混频过程的另一个重要应用是相位共轭技术。在图 2 所示的结构中, 入射光 E_1 、 E_2 、 E_3 将通过非线性简并四波混频过程产生探测光 E_3 的相位共轭光 E_4 , 利用 E_4 光的相位共轭特性, 可以修正 E_3 光的空间相位畸变。这里要强调的是, 在透射光栅起主要作用的结构中, 相位共轭光 E_4 将仅携带 E_2 光所携带的时域信息。这样一种过程可以实现消除非均匀媒质致空间相位畸变的时域信息传递的应用。

设入射光 E_1 、 E_3 为无调制的连续光, 入射光 E_2 是高速振幅调制光, 所谓高速是指其

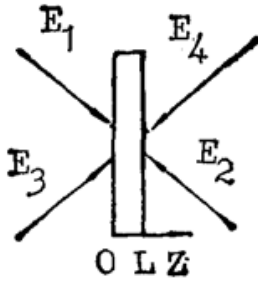


Fig. 1 Sketch of DFWM

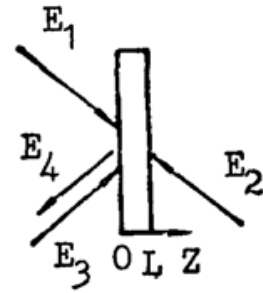
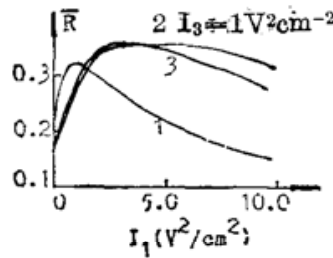
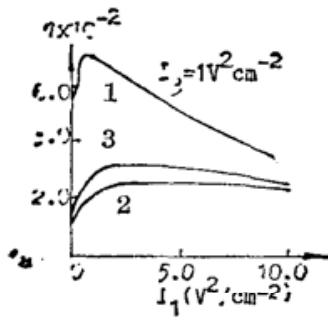
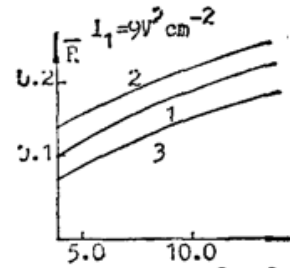
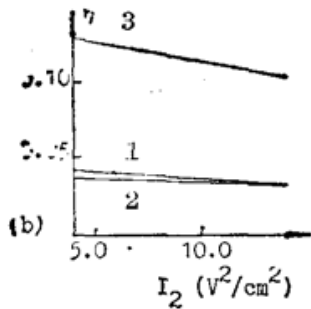


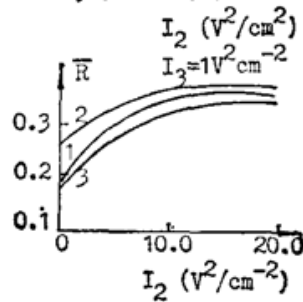
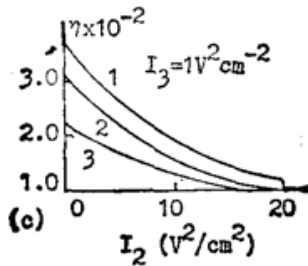
Fig. 2 Sketch of DFWM phase Conjugation



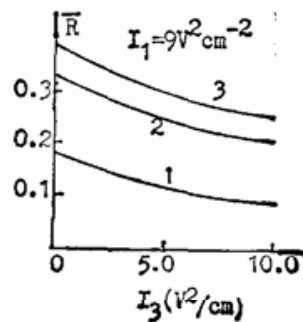
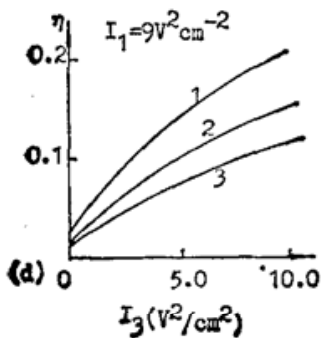
- 1: $I_2 = 0$, $I_2 = 9.3 V^2/cm^2$
- (a) 2: $I_2 = 4 V^2/cm^2$, $I_2 = 21 V^2/cm^2$
- 3: $I_2 = 4 V^2/cm^2$, $I_2 = 9.3 V^2/cm^2$



- 1: $I_2 = 0$, $I_3 = 1 V^2/cm^2$
- (b) 2: $I_2 = 1 V^2/cm^2$, $I_3 = 1 V^2/cm^2$
- 3: $I_2 = 0$, $I_3 = 4 V^2/cm^2$



- 1: $I_1 = 9 V^2/cm^2$, $I_2 = 4.4 V^2/cm^2$
- (c) 2: $I_1 = 9 V^2/cm^2$, $I_2 = 9.6 V^2/cm^2$
- 3: $I_1 = 4 V^2/cm^2$, $I_2 = 9.6 V^2/cm^2$



- 1: $I_2 = 0$, $I_2 = 9.3 V^2/cm^2$
- (d) 2: $I_2 = 4 V^2/cm^2$, $I_2 = 21 V^2/cm^2$
- 3: $I_2 = 9 V^2/cm^2$, $I_2 = 27 V^2/cm^2$

Fig. 3 Characteristic of η , \bar{R}

调制周期 $T \ll$ 该晶体光折变效应的响应时间, 其场表示式为

$$E_2(z, t) = \left\{ E_-(z, t) + [E_+(z, t)/2][1 + a(t)] \right\} \exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] + c.c. \quad (5)$$

$$a(t) = \begin{cases} 1, & t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t, \\ -1, & t_0 + \Delta t \leq t \leq t_0 + T, \end{cases}$$

式中 t_0 是调制光任一周期的起始时刻, $E_-(z, t)$ 、 $E_+(z, t)$ 分别为调制光的直、交流分量。我们对描述简并四波混频相位共轭过程特性的 H 矩阵进行了计算机数值求解, 定义了描述调制信息由 E_2 转移到 E_4 的转换效率 η 和平均相位共轭反射率 \bar{R} 为

$$\eta = [I_{40}(t)/I_{2L}(t)] = |H_{42}(0)|^2, \quad \bar{R} = [\overline{I_{40}(t)}/I_{30}] = |H_{42}(0)|^2 [\overline{I_{2L}(t)}/I_{30}]. \quad (6)$$

图 3 所示为 η 和 \bar{R} 的特性曲线。为了反映 I_4 光携带信息相对 I_2 光携带信息的保真性能, 又计算了转换效率 η 随调制信息占空比 ($\Delta t/T$) 的变化规律, 如图 4 所示曲线。在计算图 3 曲线时, 取 $I_1 = 8 \text{ cm}^{-1}$, $L = 0.15 \text{ cm}$, $\Delta t/T = 0.5$, 在计算图 4 曲线时, 取 $I_1 = 14 \text{ cm}^{-1}$, $L = 0.2 \text{ cm}$ 。图中光强 I 按 $I = |E|^2$ 定义。

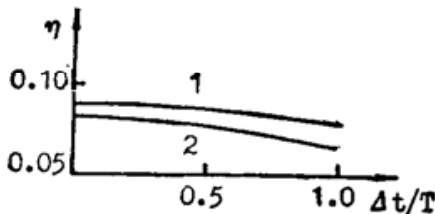


Fig. 4 $\eta \sim \Delta t/T$ ($I_1 = 9 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$,
 $I_3 = 1 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$)

1: $I_2 = 0 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, $I_{2\sim} = 9.3 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$;

2: $I_2 = 4 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$, $I_{2\sim} = 21 \text{ V}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$

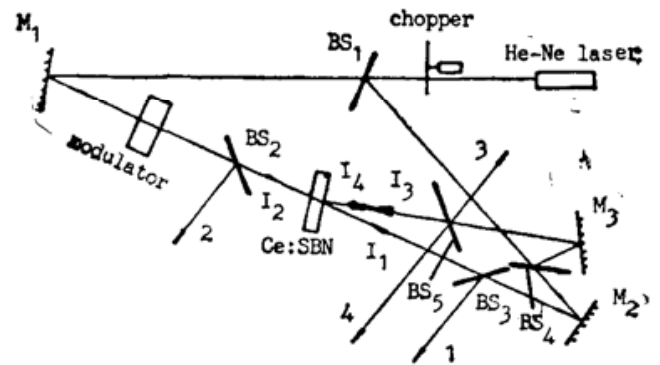


Fig. 5 Sketch of experimental apparatus

二、实 验

实验装置如图 5 所示, 入射光在 SBN 晶体内均为 e 光偏振, 调制器是声光调制器或马达调制器, 可分别使信号光中包含或不包含直流分量, 斩波器的设置是为了在示波器显示的波形中提供基准线。实验测得的转换效率 η 和平均相位共轭反射率 \bar{R} 的特性曲线如图 6 所示。在实验中, 声光调制器信号频率为 $f = 3 \text{ kHz}$, 马达调制器信号频率为 $f = 2 \text{ kHz}$, 调制信号的占重比除占空比实验外, 均取 $(\Delta t/T) = 0.5$, 晶体的厚度 $L = 1.5 \text{ cm}$ 。此外, 因实验所用的探测器未经校准, 故所示光强数值均为相对值。

为了研究时域调制信息的传输特性, 在 I_1, I_3 为等幅波、 I_2 为经声光调制器和马达调制器调制了的高速调制光的情况下, 拍摄了 I_2, I_3 和 I_4 光的波形照片, 如图 7、图 8 所示。由该图可见, I_4 光带有时域信息, 并且与 I_2 携带的信息相同, 特别是图 8 波形照片中, I_4 光调制信息的调制度并未因 I_3 直流分量的存在而改变, 仍与 I_2 光的调制度相同, 等于 1。进一步, 在 I_2, I_1 (或 I_3) 为等幅波、 I_3 (或 I_1) 为经声光调制器调制了的高速调制光的情况下, 分别拍摄了 I_1, I_4 和 I_3, I_4 光的波形照片, 如图 9 所示。由该图可见, 在这些情况下, I_4 光和 I_1 或 I_3 光的波形不同, 不携带信息, 为等幅波。此外, 为了考察调制信号占空比的变化对传输调制信息保真度的影响, 作者还利用 55 kHz 、13 位巴克码通过声光调制器调制了 I_2 光、在

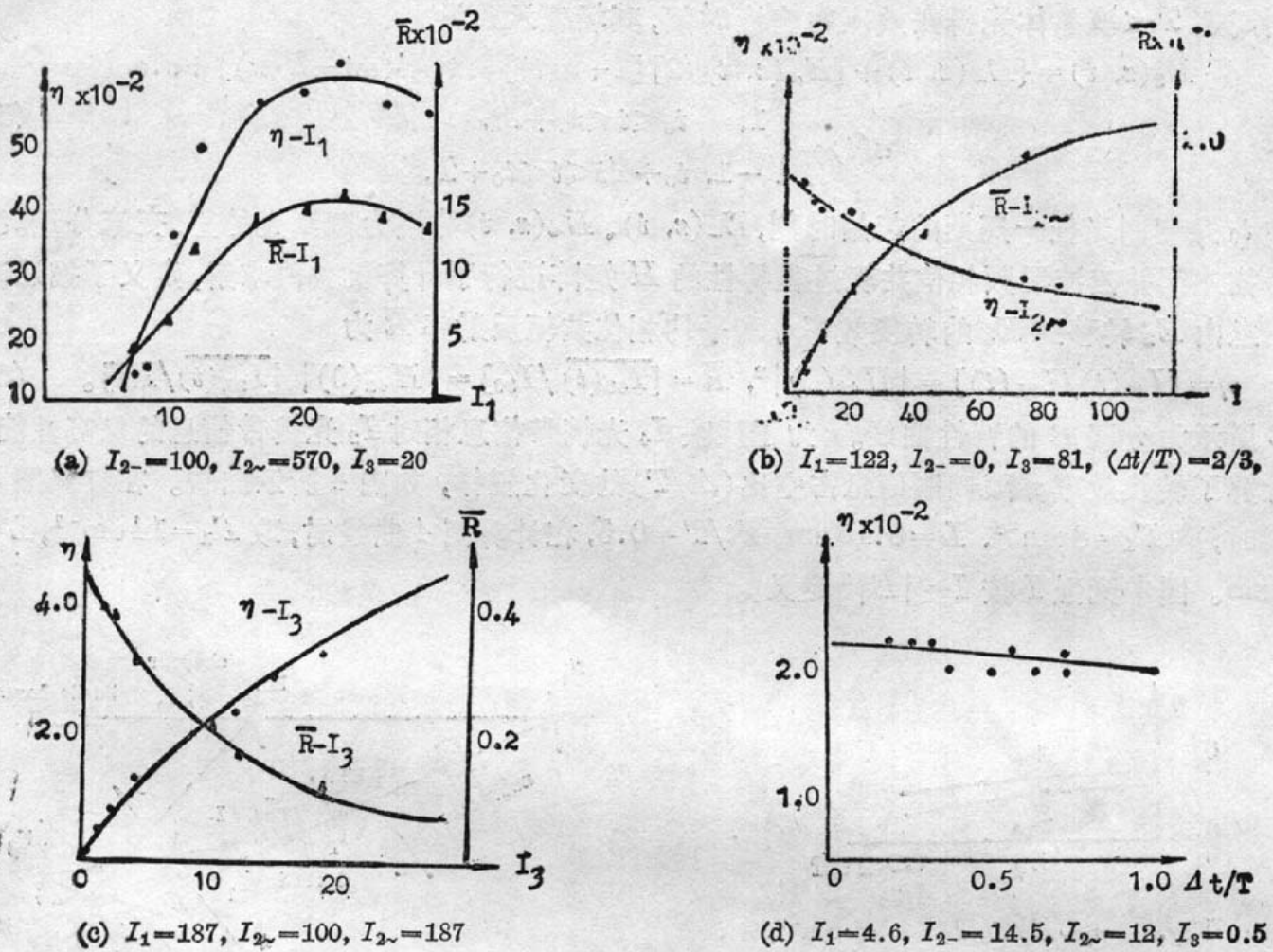
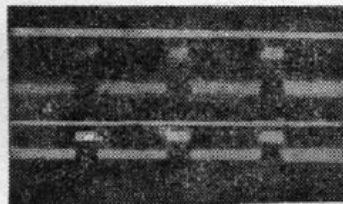
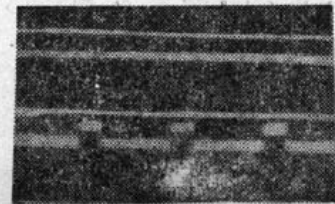


Fig. 6 Experimental Curve of η, \bar{R}

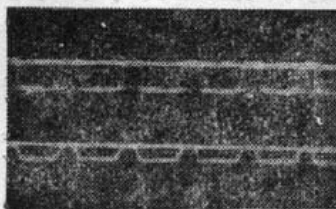


(a) upper: I_2 , lower: I_4

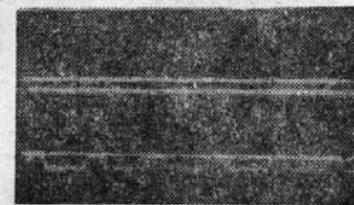


(b) upper: I_3 , lower: I_4

Fig. 7 Photography of I_2, I_3, I_4 in case of A-O modulation

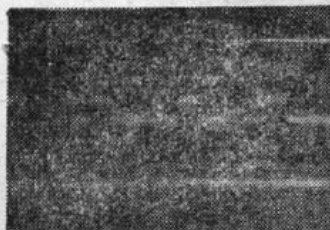


(a) upper: I_2 , lower: I_4

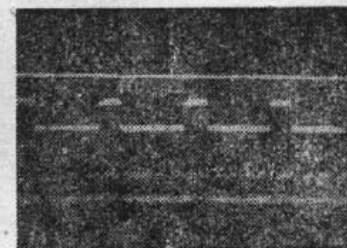


(b) upper: I_3 , lower: I_4

Fig. 8 Photography of I_2, I_3, I_4 in case of motor modulation

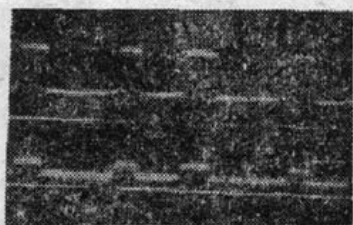
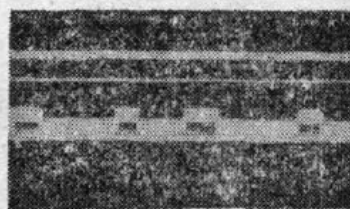


(a) upper: I_1 , lower: I_4



(b) upper: I_3 , lower: I_4

Fig. 9 Photography of I_1, I_4 and I_3, I_4

(a) upper: I_2 , lower: I_4 (b) upper: I_3 , lower: I_4 Fig. 10 Photography of I_2 , I_3 , I_4 in case of coded modulation

I_1 、 I_3 为等幅光的情况下, 拍摄了 I_2 、 I_3 和 I_4 光的波形照片, 如图 10 所示。由该图可见, I_4 光载有与 I_2 光相同的时域信息, 也为 55 kHz、13 位巴克码调制的信息光, 而与等幅光 I_3 的波形完全不同。

三、讨 论

上面给出的理论计算曲线和实验测量曲线的规律基本上一致。由这些结果可以看出:

(1) η 为相位共轭光强 I_{40} 与高速调制光强 I_{2L} 的比值, \bar{R} 为平均相位共轭光强 \bar{I}_{40} 与入射探测光强 \bar{I}_{30} 的比值, 它们均可表征在光折变晶体中由 I_1 与 I_3 形成光栅, 由 I_2 读出, 产生带有时域信息的相位共轭光的能力。显然, 在这个四光波作用的过程中, 任一入射光强的变化, 都将影响相位共轭光强的产生, 并且, 光栅愈强, 读出光愈强, 所产生的相位共轭光也愈强。例如, 在 I_1 、 I_2 入射光强固定的情况下, 探测光 I_3 愈强, 所形成的光栅愈强, 由理论和实验的 $\eta \sim I_3$ 曲线可见, 所产生的 I_4 光愈强; 在 I_1 、 I_3 入射光强固定的情况下, 入射的高速调制信号光 I_2 愈强, 读出光愈强, 由理论和实验的 $\bar{R} \sim I_2$ 曲线可见, 所产生的 I_4 光也愈强, 但由理论和实验的 $\eta \sim I_1$ 、 $\bar{R} \sim I_1$ 曲线可见, I_1 增大引起 I_4 光强的变化规律为非单调性质。这是由于在光折变晶体中, 简并四波混频过程是以双光束耦合为基础的, 它可以看作为 I_1 、 I_3 和 I_2 、 I_4 形成的两个光栅的动态贡献。在 I_1 较小时, 随着 I_1 的增大, 光栅变强, I_4 将随之增大, 但因为 I_1 在该过程中也要被放大, 当 I_1 较大时, 随 I_1 的增大, I_3 会因耦合而明显下降, 从而使光栅减小, 导致 I_4 所获增益反而下降, 结果使得 I_4 减小。因此, 为获得需要大小的带时域信息的相位共轭光强, 应选取适当大小的入射光强 I_1 、 I_2 、 I_3 。

(2) 由图 7、图 8、图 9 所示照片可见, 当 I_1 或 I_3 携带时域信息, I_2 为无调制连续光时, I_4 也为无调制的连续光; 当 I_1 、 I_3 为无调制连续光, I_2 为时域调制光时, I_4 也为同样的时域调制光。特别是当 I_2 为马达调制光时, 调制度为 1, 相应的 I_4 也为调制度等于 1 的马达调制信息光, 其调制信息中无 I_1 、 I_3 造成的直流分量部分。由此可见, 相位共轭光的时域信息仅由高速调制信号光 I_2 决定, 而与 I_1 、 I_3 所携带的时域信息无关。这可以解释为在光折变晶体中, 双光束耦合是简并四波混频的基础, 并且在本文的实验结构中, 反射光栅可以忽略不计, 只需考虑 I_1 、 I_3 和 I_2 、 I_4 光形成的透射光栅的贡献所致。由此, 可以利用光折变晶体中的简并四波混频过程所产生的相位共轭光, 实现单向消空间相位畸变的时域信息传输, 并可利用同一个光折变晶体实现双向无串音的时域信息传递与放大。例如, 在简并四波混频结构中, 入射光 I_2 、 I_3 带有不同的时域调制信息, 则可实现双向 I_3 、 I_4 无串音的信息传递和放大。

(3) 由理论和实验得到的 $\eta \sim (\Delta t/T)$ 曲线可见, 随高速振幅调制光 I_2 的调制信息占空比发生变化, 其信息转换效率 η 的变化很小。因此, 如果入射高速振幅调制光采用编码脉冲调制, 引起 I_4 光调制特性的变化很小, 在本文进行的大量实验中, 尚未观察到因调制信号占空比的变化引起的信息失真。正如图 10 照片所示, 当采用 55 kHz、13 位巴克码调制时, 相位共轭光 I_4 与高速振幅调制光 I_2 的时域特性非常一致。因此, 可以推断, 利用该相位共轭结构, 可以实现消除非均匀媒质引起空间相位畸变的时域编码通信。如果将该结构再与相应的光折变晶体中的双光束耦合结合在一起, 便可进一步将携带时域信息的相位共轭光进行放大, 这在实际应用中, 有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 过巴吉等;《光学学报》, 1990, 10, No. 4 (Apr), 299~305.
- [2] 石顺祥等;《光学学报》, 1990, 10, No. 4 (Apr), 306~312.
- [3] 关义春等;《中国激光》, 1990, 16, No. 11 (Nov), 668~67.

Study on properties of DFWM of high speed amplitude modulated beams in photorefractive crystal

SHI SHUNXIANG, GUAN YICHUN, LIU JUAN, AN YUYING AND GUO SIJI
(Department of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 4 February 1991)

Abstract

The properties of degenerated four-wave mixing (DFWM) of high speed amplitude modulated beams in photorefractive crystal are theoretically analysed. The experimental results in Ce:SBN crystal are given. The results indicate that in photorefractive crystal DFWM may be used for encode communication corrected space phase distortion and for transmission and amplification of two directional signal.

Key words: photorefractive crystal, high speed amplitude modulated beams, DFWM.