

光折变晶体中高速调制光放大特性的研究*

石顺祥 关义春 刘娟 过己吉

(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的放大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, 并从物理概念上进行了讨论, 指出光折变晶体中的双光束耦合可以用于时域编码通讯。

关键词: 光折变晶体; 高速调制光; 放大特性。

在文献[1][2]中给出了光折变晶体中高速调制光传输和放大的基本理论, 本文将进一步对光折变晶体中高速调制光的放大特性进行研究。

一、理 论

由 Kukhtarev 方程出发可以推得^[1,2], 描述图 1 所示高速调制光双光束耦合过程的基本方程

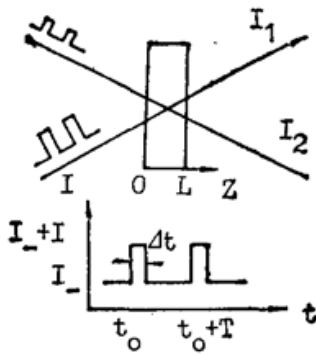


Fig. 1 Sketch of two-beam interaction

$$\frac{\partial E_1(z, t)}{\partial z} = -(\Gamma_1 + i\Gamma_2) \frac{\overline{m(z, t)}}{|E_1(z, t)|^2 + |E_2(z, t)|^2} E_2(z, t) - \frac{1}{2} \alpha E_1(z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_2(z, t)}{\partial z} = (\Gamma_1 - i\Gamma_2) \frac{\overline{m(z, t)}}{|E_1(z, t)|^2 + |E_2(z, t)|^2} E_1(z, t) - \frac{1}{2} \alpha E_2(z, t), \quad (2)$$

式中 $(\Gamma_1 + i\Gamma_2)$ 为双光束耦合系数,

$$\overline{m(z, t)} = \overline{E_1(z, t) E_2^*(z, t)},$$

α 为损耗系数。对于诸如 BaTiO₃、SBN 等以扩散机制为主的晶体, 可以认为 $\Gamma_2 = 0$, 求解方程(1)、(2)得到

$$E_1(z, t) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2} \alpha z\right) \{E_{10}(t) [B_+(0)B_+(z) + B_-(0)B_-(z)] + E_{20}(t) [B_+(0)B_-(z) - B_-(0)B_+(z)]\}, \quad (3)$$

$$E_2(z, t) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2} \alpha z\right) \{E_{10}(t) [-B_+(0)B_-(z) + B_-(0)B_+(0)] + E_{20}(z) [B_+(0)B_+(z) + B_-(0)B_-(z)]\}, \quad (4)$$

$$B_+(z) = \left[1 + \operatorname{sech} \left(-\frac{C_0 \Gamma_1}{I_0} z + C_1 \right) \right]^{1/2}, \quad B_-(z) = \left[1 - \operatorname{sech} \left(-\frac{C_0 \Gamma_1}{I_0} z + C_1 \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$I_0 = |\overline{E_{10}(t)}|^2 + |\overline{E_{20}(t)}|^2, \quad C_0^2 = 4 \left[|\overline{m(0, t)}|^2 + \left(|\overline{E_{10}(t)}|^2 - |\overline{E_{20}(t)}|^2 \right)^2 \right]$$

$$C_1 = \tanh^{-1} \left[\left(|\overline{E_{10}(t)}|^2 - |\overline{E_{20}(t)}|^2 \right) / C_0 \right].$$

如果相互作用光为如下形式的等幅方波高速调制光

$$E(z, t) = \left\{ E_-(z) + \frac{1}{2} E_{\sim}(z) [1 + a(t)] \right\} \exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] + C. C., \quad (6)$$

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

式中 t_0 为调制光任一周期的起始时刻, T 为调制周期, E_- 、 E_{\sim} 分别为调制光的直流、交流分量。在入射泵浦光 I_{10} 是等幅光, 信号光 I_{20} 是调制光的双光束耦合情况, 通过对(3)、(4)进行运算, 可以得到描述信号光传输放大特性的关系曲线, 其中, 定义交流信号放大倍数为

$$K = \frac{I_{2\sim}(\Delta)}{I_{2\sim}(0)} = \frac{I_{2\sim}(L)}{I_{2\sim}}, \quad (7)$$

在运算中, 取 $\Gamma_2 = 0$, $L = 0.2 \text{ cm}$, $\alpha = 0.02 \text{ cm}^{-1}$, 除图 2 曲线取 $\Gamma_1 = 8$ 外, 其它曲线均取 $\Gamma_1 = 14$ 。

(1) 图 2 为在不同入射泵浦光强 I_{10} 、不同入射信号光直流、交流分量 I_{20-} 、 $I_{20\sim}$ 的情况下, 放大倍数 K 与占空比 $\Delta t/T$ 的关系曲线。可见, 在给定的条件下, 交流信号放大倍数随占空比的增大略有增加。图 2 中曲线的参量值为 $I_{10}(\text{W/cm}^2)$ 、 $I_{20-}(\text{W/cm}^2)$ 、 $I_{20\sim}(\text{W/cm}^2)$, 相应三条曲线的参量值分别为: No. 1: 49.3、1、4; No. 2: 292、15、55; No. 3: 29.3、4、15.5。

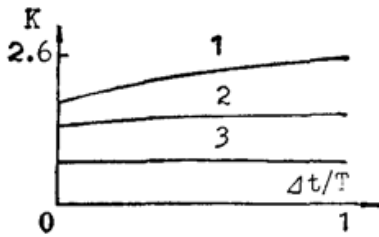


Fig. 2

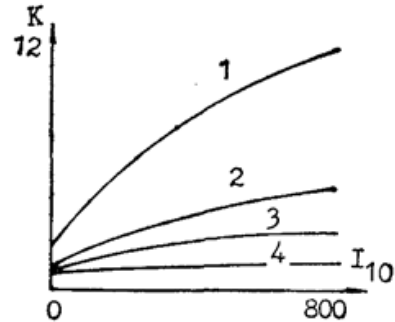


Fig. 3

(2) 图 3 为在不同入射信号光直流、交流分量、占空比 $(\Delta t/T) = (1/2)$ 的情况下, 放大倍数 K 与入射泵浦光强 I_{10} 的关系曲线。可见, 放大倍数随泵浦光的增强而增大。图 3 中曲线的参量值为 $I_{20-}(\text{W/cm}^2)$ 、 $I_{20\sim}(\text{W/cm}^2)$, 相应四条曲线的参量值分别为: No. 1: 0.04、4.8; No. 2: 4、12; No. 3: 25、24; No. 4: 100、300。

(3) 图 4 为在不同入射泵浦光强 I_{10} 、不同入射信号光交流分量 $I_{20\sim}$ 、占空比 $(\Delta t/T) = (1/2)$ 的情况下, 放大倍数 K 与入射信号光直流分量 I_{20-} 的关系曲线。可见, 在 I_{20-} 较小时, K 随 I_{20-} 的增大而迅速减少, 当 I_{20-} 较大时, K 基本上不变。图 4 中曲线的参量为 $I_{10}(\text{W/cm}^2)$ 、 $I_{20\sim}(\text{W/cm}^2)$, 相应四条曲线的参量值分别为: No. 1: 625、6; No. 2: 625、30; No. 3: 625、110; No. 4: 100、100。

(4) 图 5 为在不同入射泵浦光强 I_{10} 、不同入射信号光直流分量 I_{20-} 、占空比 $(\Delta t/T) =$

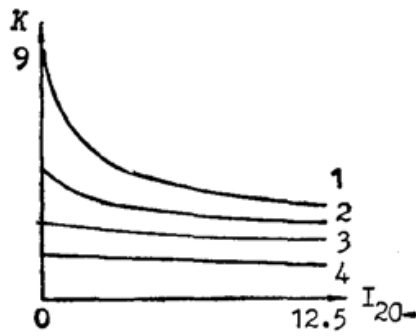


Fig. 4

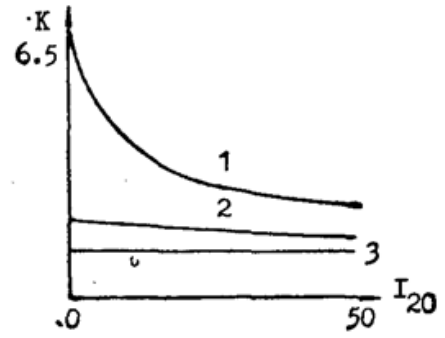


Fig. 5

(1/2)的情况下,放大倍数 K 与入射信号光交流分量 $I_{20\sim}$ 的关系曲线。可见, K 随 $I_{20\sim}$ 的增大而减小,当 $I_{20\sim}$ 较大时, K 基本上为常数。图 5 中的曲线的参量值为 $I_{10}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、 $I_{20\sim}(\text{W}/\text{cm}^2)$,相应三条曲线的参量分别为 No. 1:625、4; No. 2:625、25; No. 3:625、100。

二、实 验

实验采用的装置如图 6 所示,该装置可以保证两光束入射到晶体上所经过的光程相等,两光束在 SBN 晶体内为 e 光偏振,以获得最强的双光束耦合。在 I_2 光路中的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。在主光路中的 1/2 波片与格兰棱镜配合可以改变 I_{10} 、 I_{20} 入射光强之比,而马达斩波器的设置是为了在示波器的显示中,提供基准线。

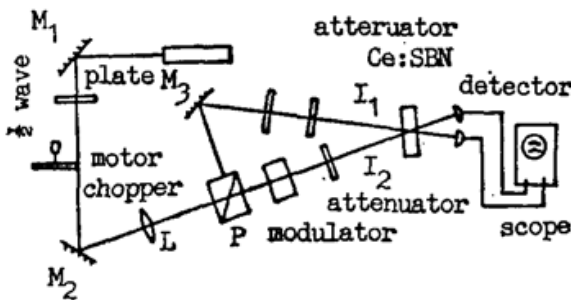


Fig. 6 Sketch of experiment set-up

实验所测得的结果如图 7~图 10 所示。它们分别为 $K \sim (\Delta t/T)$ [参量为 $I_{10}(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 、 $I_{20\sim}(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 、 $I_{20\sim}(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 、 $f(\text{kHz})$], 三条曲线对应的参量值分别为 No. 1:49.3、1.4、10; No. 2:9.8、1.3、1、10; No. 3:29.3、4、15.5、30]; $K \sim I_{10}$ [参量为 $I_{20\sim}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、 $I_{20\sim}(\text{W}/\text{cm}^2)$], 三条曲线对应的参量分别为 No. 1: 0、2; No. 2: 2.03、6.5; No. 3: 0、20.7]; $K \sim I_{20\sim}$ [参量分别为 $I_{10}(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) = 61.9$, $I_{20\sim}(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) = 1$]; $K \sim I_{20\sim}$ [参量分别为 a: $I_{10} = 4.55$ 、 $I_{20\sim} = 12$; b: $I_{10} = 1.7$ 、 $I_{20\sim} = 0$] 的关系曲线。实验所取的数据: 声光调制信号频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 马达调制信号频率 $f = 8 \text{ kHz}$, 调制信号占空比 $(\Delta t/T)$

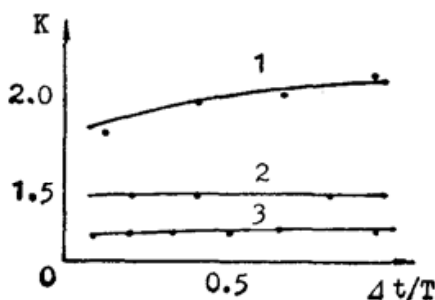


Fig. 7

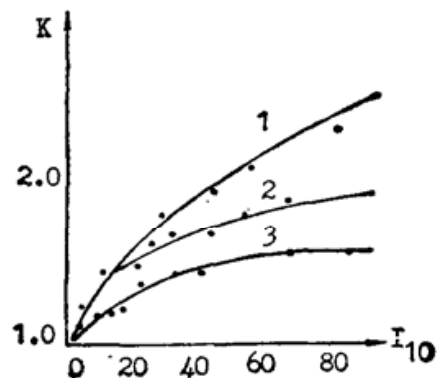


Fig. 8

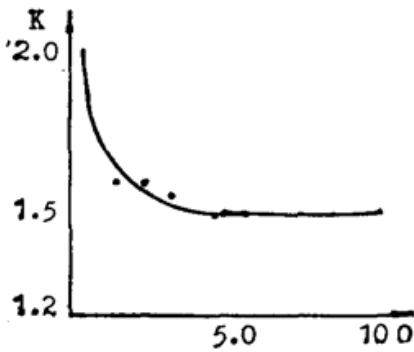


Fig. 9

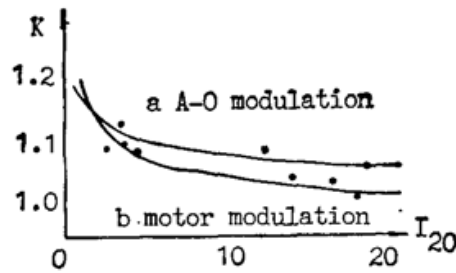


Fig. 10

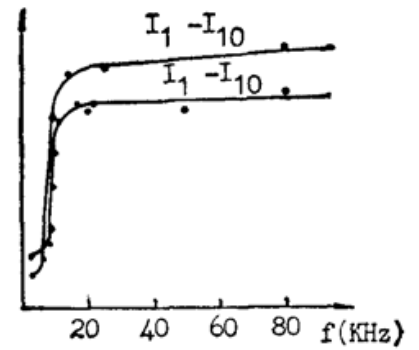


Fig. 11

除图 7 所示实验外,均取 $1/2$ 。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。为了进一步建立起“高速”的概念,实验改变调制频率,测得了稳定的双光束耦合、直流分量增量与调制频率的关系曲线,如图 11 所示。

三、结 论

(1) 在慢时间响应的光折变晶体中,可以实现时域高速调制光的传输和放大。所谓“高速”是指调制周期 T 远小于光折变晶体的响应时间。比如,用于实验的 SBN 晶体,响应时间为秒的量级,故测得调制频率大于几百 Hz 即可实现稳定的双光束耦合,从而大于几百 Hz 的调制光就可视为高速调制光。显然,对于响应时间为数十秒的 Fe:LiNbO₃ 晶体,几十 Hz 的调制频率光,也就可以视为高速调制光了。因此,根据可实现稳定耦合的调制频率下限,可以确定光折变晶体的响应时间数量级。

(2) 上面给出的高速调制光在光折变晶体中放大特性的理论分析和实验结果,均较好地吻合。从光折变晶体中高速调制光双光束耦合的机制来看^[1],两光束耦合的强弱,取决于光致光栅的强弱,也即取决于干涉场的交叉项。在泵浦光强大于信号光强,且信号光不是特别强的情况下,随着占空比的增大,交叉项略有增大,所以耦合也略有增大,正如图 2、图 7 所示,因在该条件下交流信号放大倍数随占空比变化很小,所以可以断言,光折变晶体中的双光束耦合可用于时域编码信号的传输和放大,也即可用于编码通讯。进一步由图 3~图 5、图 8~图 10 给出的关系曲线可以说明:(1) 入射泵浦光强 I_{10} 增大,耦合到信号光中的能量也将增大,但随着信号光强(直、交流分量)的增大,由于抽空效应,将出现信号光放大的饱和现象;(2) 在信号光 I_{20} 的直流、交流分量较大时,放大倍数较小且基本上不变,当直流、交流分量较小时,放大倍数较大,但随信号光强发生变化。因此,在弱信号光强的情况下,被放大的振幅调制光将可能产生信号失真,故在利用光折变晶体中的双光束耦合进行高速调制光的放大时,必须考虑线性工作状态的问题。

(3) 入射泵浦光 I_{10} 为非调制光、信号光 I_{20} 为高速调制光,通过双光束耦合后,信号光的直流、交流分量均被放大,但各自的放大量不同,特别是直流分量的大小还会直接影响交流分量的放大倍数,即使在 I_{20} 中不包含直流分量,也会在双光束耦合后,出现直流分量。这也是光折变晶体在时域高速调制光传输、放大应用中必须注意的问题。与此同时,泵浦光强被减弱,而且其中还包含了因耦合而产生的交流分量,但其相位与信号光相反。如果入射的

泵浦光 I_{10} 是高速调制光、信号光 I_{20} 是非调制光, 则通过双光束耦合后, 泵浦光中的直流、交流分量均被减弱(各自减弱的程度不同), 而信号光将被放大, 同时, 其内还包含有与泵浦光同相的交流分量。本文利用 $k8\text{ Hz}$ 的马达调制光和 55 kHz 、13 位巴克码调制的声光调制光进行了实验, 拍摄了如图 12、图 13、图 14 所示的照片。图 12 所示两照片反映了泵浦光为非调制光、信号光为马达调制光在耦合前后的情况。图 13 所示的两照片反映了泵浦光是马达调制光、信号光是由巴克码调制的声光调制光在耦合前后的情况。在上述照片中, 上下图中靠下的直线为零线。显然, 光折变晶体中的双光束耦合效应确实可用于时域编码信号光的放大, 因而可用于编码通讯。

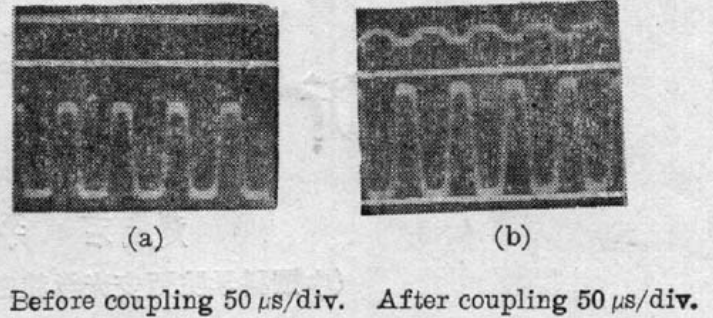
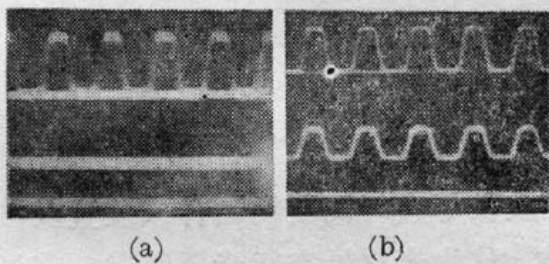
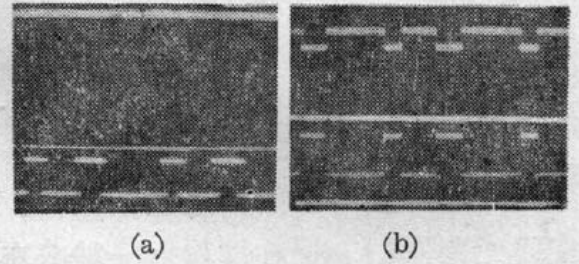


Fig. 12



Before coupling 50 $\mu\text{s}/\text{div}$. After coupling 50 $\mu\text{s}/\text{div}$.
Fig. 13



Before coupling 50 $\mu\text{s}/\text{div}$. After coupling 50 $\mu\text{s}/\text{div}$.
Fig. 14

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.

Amplification properties of high speed amplitude modulated beams in photorefractive crystal

SHI SHUNXIANG, GUAN YICHUN, LIU JUAN AND GUO SIJI
(Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 6 November 1990; revised 2 January 1991)

Abstract

The amplification properties of high speed amplitude modulated beams in photorefractive crystal are theoretic ally analysed. The experimetal results in Ce: SBN crystal are given. The physical mechanism is discussed. The results indicate that two-beam coupling in photorefractive crystal can be applied in the encode communication.

Key words: photorefractive crystal; high speed amplitude modulated beam.