

Fe:LiNbO₃ 晶体简并四波混频 (DFWM) 在光学图象处理中的应用

张洪钧 戴建华 王鹏业 高存秀

(中国科学院物理研究所)

吕 团 孙 刘 文 潮

(福建师范大学物理系)

徐 良 瑛

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

1983年8月12日收到

提 要

本文介绍 Fe:LiNbO₃ 晶体在波长为 6328 Å 的低功率激光下的简并四波混频(DFWM)现象。给出了在不同泵浦功率下,共轭波强度随照射时间变化的实验曲线。验证了共轭波的位相补偿特性,并利用该特性校正了位相畸变的图象,得到了与理论相一致的实验结果。

一、 引 言

利用多波混频产生位相共轭波是在 1976 年首先由 Yariv^[1] 提出的。他指出,光波在多模光纤传输过程中因模畸变而引起的象质损坏可以利用三波混频(TWM)产生的共轭波来补偿。1977 年, TWM 所产生的共轭波便被 Avizonis^[2] 在实验中观察到了。1977 年 Hellwarth^[3] 在这个基础上指出,利用四波混频(FWM)也能够产生共轭波,而且它容易满足位相匹配的要求。不久, Bloom 等人^[4]和 Jensen 等人^[5]分别在克尔介质和 CS₂ 溶液中,利用简并四波混频(DFWM)得到了共轭波。在以后短短的几年中,又相继在多种非线性光学介质中观察到 DFWM 现象^[6]。

由于 DFWM 所产生的共轭波具有位相补偿的特性和实时处理的优点,因此很自然地考虑到它在光学信息处理中可能的应用。1981 年 Levinson 等人^[7]将它应用于亚微米照相平板印刷术中。1982 年 White 等人^[8]用它来进行傅里叶光学中的卷积和相关运算。此外,人们还期望在卫星和天文照片的实时处理,长距离光通讯以及自适应光学等技术中,可以利用 DFWM 来消除大气湍流的干扰。然而,大多数非线性光学介质产生 DFWM 所需的泵浦功率密度都相当高,即使少数一些介质所需的功率密度较低,但往往又由于其灵敏度和分辨率低而不能适用于光学图象处理。

我们用 Fe:LiNbO₃ 晶体在波长为 6328 Å 的低功率激光下,观察到了 DFWM 所产生

的共轭波。同时,由于该晶体具有足够的灵敏度和较高的分辨率,我们还成功地将它用来校正位相畸变的图象。本文为在低功率下产生 DFWM, 并用于校正位相畸变的图象提供了一种新方法。

二、共轭波的位相补偿原理

利用 DFWM 产生共轭波及其位相补偿原理在有关文献 [3—6] 中已作了详细的阐述。如图 1 所示,假设入射到晶体的两束泵浦波分别为 E_1 和 E_2 , 信号波为 E_p , 其中

$$E_1(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_1(\mathbf{r}) e^{i(\omega_1 t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.}, \quad (1)$$

$$E_2(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_2(\mathbf{r}) e^{i(\omega_2 t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.}, \quad (2)$$

$$E_p(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_p(\mathbf{r}) e^{i(\omega_p t - \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.}, \quad (3)$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_p 为相应光场 E_1, E_2 和 E_p 的慢变复振幅, c.c. 为复数共轭。晶体的非线性极化强度为

$$P_{NL} = \frac{1}{2} \chi^{(3)} \varepsilon_1(\mathbf{r}) \varepsilon_2(\mathbf{r}) \varepsilon_p^*(\mathbf{r}) \cdot \exp\{i[(\omega_1 + \omega_2 - \omega_p)t - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_p) \cdot \mathbf{r}]\} + \text{c.c.}, \quad (4)$$

式中 $\chi^{(3)}$ 是晶体的三阶非线性极化率。

当泵浦波和信号波的频率相同,即 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p = \omega$, 且两束泵浦波的方向相反,即 $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = 0$ 时,则 (4) 式可改写成

$$P_{NL} = \frac{1}{2} \chi^{(3)} \varepsilon_1(\mathbf{r}) \varepsilon_2(\mathbf{r}) \varepsilon_p^*(\mathbf{r}) e^{i(\omega t + \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.}. \quad (5)$$

若产生的辐射波为 E_c , 则有

$$E_c(\mathbf{r}, t) \propto \chi^{(3)} \varepsilon_1(\mathbf{r}) \varepsilon_2(\mathbf{r}) \varepsilon_p^*(\mathbf{r}) e^{i(\omega t + \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})} + \text{c.c.}. \quad (6)$$

比较 (6) 与 (3) 式可以看出, 当满足位相匹配要求, 且泵浦波为平面波时, E_c 与 E_p 是严格共轭的, 它们的传播方向正好相反。

如果信号波 E_p 在入射到晶体之前, 先通过一位相畸变介质, 例如一个质量差的光学窗口或透镜。此介质使信号波产生一附加的位相变化 $e^{i\phi(x, y)}$, 即这时通过介质后的信号波的波前发生了畸变, 成为

$$E_p'(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2} \varepsilon_p(\mathbf{r}) e^{i[\omega t - \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r} + \phi(x, y)]}. \quad (7)$$

这里略去了 c.c. 项。因此到达晶体的信号波以及 DFWM 所产生的共轭波的位相也都发生相应的畸变。当共轭波传播至介质的后表面时, 其光场的复振幅分布为

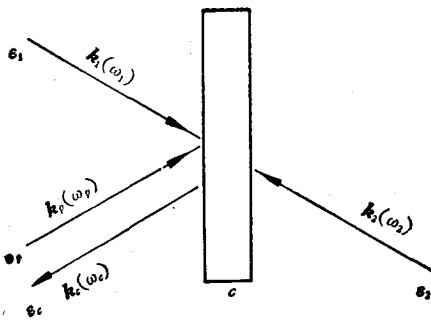


图 1 DFWM 原理示意图

— 非线性光学介质; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——泵浦波;
 ε_p ——信号波; ε_c ——共轭波

$$E'_c(\mathbf{r}, t) \propto \chi^{(3)} \varepsilon_1(\mathbf{r}) \varepsilon_2(\mathbf{r}) \varepsilon_p^*(\mathbf{r}) e^{i[\omega t + \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r} - \phi(x, y)]}. \quad (8)$$

当 E'_c 精确地沿着 E_p 原来的路径反向地通过介质时, 再次迭加上 $e^{i\phi(x, y)}$ 的位相变化, 故有

$$E'_c(\mathbf{r}, t) \cdot e^{i\phi(x, y)} \propto \chi^{(3)} \varepsilon_1(\mathbf{r}) \varepsilon_2(\mathbf{r}) \varepsilon_p^*(\mathbf{r}) e^{i(\omega t + \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})}. \quad (9)$$

这样, 由介质所引起的位相畸变便完全被补偿了. 利用 DFWM 校正位相畸变的图象正是基于上述原理的.

三、实验和结果

观察 Fe:LiNbO₃ 晶体 DFWM 现象的实验装置如图 2 所示. He-Ne 激光器发出的波长为 6328 Å 的激光束经分束器 BS_1 , BS_2 以及反射镜 M_2 , M_3 反射后, 形成两束泵浦波 E_1 和 E_2 从 Fe:LiNbO₃ 晶体的两侧入射到晶体上. 调节光路时, 必须使 E_1 和 E_2 在同一直线上, 且传播方向准确相反. 否则将由于 E_2 方向的任何微小的偏差, 严重地影响处理后的图象质量. 信号波 E_p 由分束器 BS_1 和反射镜 M_1 提供. 本实验所采用的 Fe:LiNbO₃ 晶

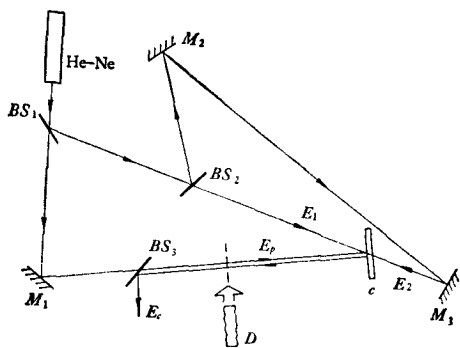


图 2 DFWM 实验装置图

BS_1, BS_2, BS_3 ——分束器; M_1, M_2, M_3 ——反射镜;
 c ——Fe:LiNbO₃晶体; D ——位相畸变介质

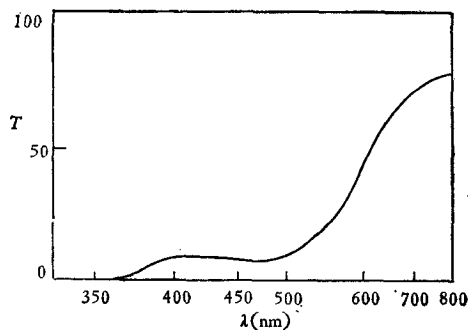


图 3 Fe:LiNbO₃ 的透过率曲线

体厚度约为 0.6mm, 分辨率约为 1600 线对/mm, 其透过率曲线 ($T-\lambda$ 曲线) 见图 3. 晶体放置的方位必须使它的 c 轴与激光的振动方向在同一平面内^[9].

Fe:LiNbO₃ 晶体 DFWM 所产生的共轭波 E_c 可借助于分束器 BS_3 观察, 结果见图 4 (b). 为了验证 E_c 的位相共轭特性, 我们在 E_p 的光路中插入位相畸变介质 D . 位相畸变后的信号波束 E'_p 和畸变位相消除后的共轭波束 E_c 分别见图 4(c) 和 (d). 比较图 4 中的四幅照片可以明显看出位相补偿的效果.

实验中, 我们测定了在不同泵浦功率 I 下, 共轭波强度 I_c 随照射时间 t 变化的响应曲线, 见图 5 (图中两束泵浦波强度 $I_1 = I_2$, 信号波强度 $I_p = 0.1\text{mW}$). 图 5 表明, 当泵浦功率不同时, 共轭波响应的快慢及强度的最大值也不同. 而更为重要的是, 实验结果还表明 Fe:LiNbO₃ 晶体可在泵浦功率很低的情况下产生 DFWM. 当用不同掺铁量的 LiNbO₃ 晶体进行实验时, 虽然响应时间随掺铁量不同而有些变化, 但产生 DFWM 所需的泵浦功率一般也都较低. 即使在 $I = 0.1\text{mW}$ (功率密度约为 $2\text{mW}/\text{cm}^2$) 时, 还能清楚地观察到共

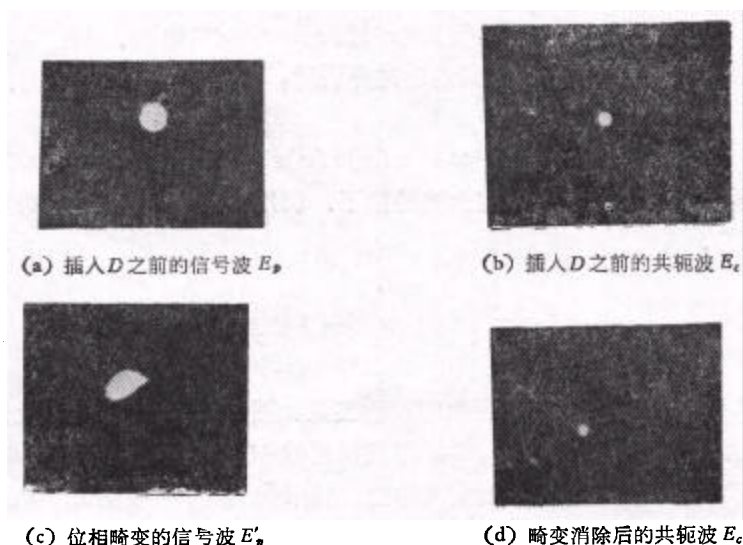
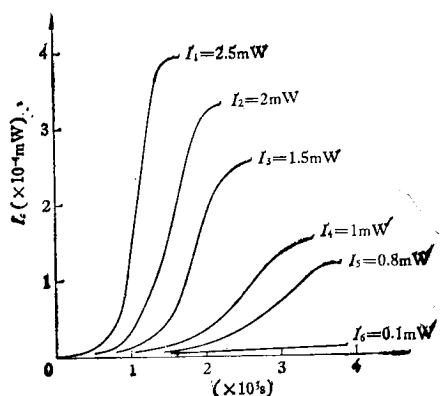
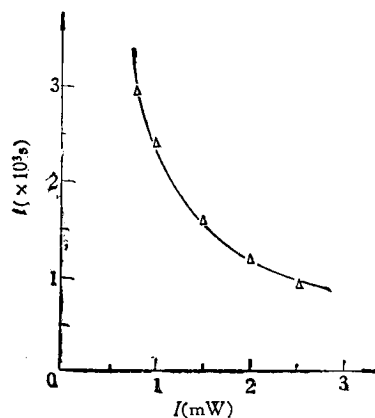


图 4

图 5 不同泵浦功率下的 I_c - t 曲线图 6 t - I 关系曲线 ($I_c = 0.65 \times 10^{-4} \text{ mW}$)

轭波. 为进一步说明响应时间与泵浦波强度之间的关系,我们在图 5 曲线的线性区以

$$I_c = 0.65 \times 10^{-4} \text{ mW}$$

为例,作出在不同泵浦功率下,共轭波强度达到该数值时所需的照射时间 t 与泵浦波强度 I 的关系曲线,如图 6 所示. 它表明,在响应曲线的线性区内,两者呈 $t = A/I$ 的关系(式中 A 是仅与晶体特性及 I_c 有关的常量). 这与 Kukhtarev^[10,11] 的理论分析是相符合的.

我们还改用 Ar^+ 激光作为泵浦波,在波长为 $4880 \text{ \AA}$ 和 $5145 \text{ \AA}$ 时,也都观察到 $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$ 晶体的 DFWM 现象.

我们认为,更有意义的是将 DFWM 应用于光学图象处理以校正位相畸变图象. 其实实验装置如图 7 所示. 实验方法与上述基本相同,只是因为作为物体 O 的图象有一定的大小,故需将信号波 E_p 扩束,为此在 E_p 光路中放置准直系统 CL ,以形成一宽平面波照明图象. 但是,由于受到阈值功率的限制,不便将泵浦波 E_1, E_2 也进行扩束. 所以在位相

畸变介质 D 和晶体之间引入傅里叶变换透镜 FL , 将经过 D 后的畸变图象作傅里叶变换, 并使其频谱呈现在 Fe:LiNbO₃ 晶体上, 亦即这时的信号波 E'_p 是畸变图象的频谱。因此, DFWM 产生的共轭波 E'_c 也需先经 FL 作傅里叶逆变换, 然后进行位相补偿, 最后才能获得没有畸变的图象。

图象处理的结果见图 8。其中图 8(a) 为原图象的照片。图 8(c) 为畸变校正后的图象, 它是借助于分束器 BS_3 在观察屏 O^* 处拍摄的(屏 O^* 的位置与物 O 的位置以 BS_3 成镜对称)。为了比较位相补偿的效果, 我们还在 FL 的高斯象面拍摄了原图象经 D 之后的畸变象, 见图 8(b)。从图 8 所示的实验结果可以看出, 图象中的位相畸变基本上消除了。

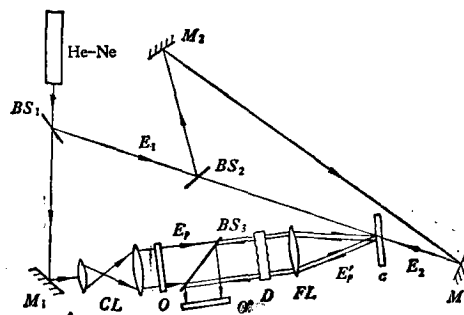


图 7 校正位相畸变图象的实验装置图

BS_1, BS_2, BS_3 ——分束器; M_1, M_2, M_3 ——反射镜; CL ——准直系统; O ——物体; D ——位相畸变介质; FL ——傅里叶变换透镜; c ——Fe:LiNbO₃ 晶体; O^* ——观察屏或照相底板

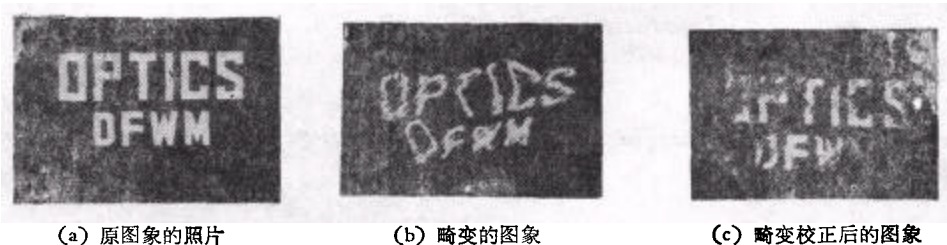


图 8 图象处理的结果

四、结 论

本文所采用的方法具有泵浦功率低, 实时处理以及可以处理较大面积的图象等特点。但是 Fe:LiNbO₃ 晶体在弱光下的 DFWM 响应时间较长, 而且存贮时间久, 所以位相畸变介质只能是静态的或准静态的。虽然增大泵浦波强度可以大大缩短响应时间, 但是由于晶体的非线性光学效应, 共轭波的光场将出现一个复杂的时间和空间分布, 严重地影响校正图象的质量。关于这点, 有待进一步深入探讨。另外, 由于使用相干光, 难免带来相干噪声, 降低了图象的信噪比。

参 考 文 献

- [1] A. Yariv, *Appl. Phys. Lett.*, 28(1976), 88; *J. Opt. Soc. Am.*, 66(1976), 301.
- [2] P. V. Avizonis, F. A. Hopf, W. D. Bamberger, S. F. Jacobs, A. Tomita, and K. H. Womack, *Appl. Phys. Lett.*, 31(1977), 435.
- [3] R. W. Hellwarth, *J. Opt. Soc. Am.*, 67(1977), 1.
- [4] D. M. Bloom and G. C. Bjorklund, *Appl. Phys. Lett.*, 31(1977), 592.

- [5] S. M. Jensen and R. W. Hellwarth, *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 166.
[6] D. M. Pepper, *Opt. Eng.*, **21**(1982), 155.
[7] M. D. Levinson, K. M. Johnson, V. C. Hanchett, and K. Chiang, *J. Opt. Soc. Am.*, **71**(1981), 737.
[8] J. O. White and A. Yariv, *Opt. Eng.*, **21**(1982), 224.
[9] D. L. Staebler and W. Phillips, *Appl. Opt.*, **13**(1974), 788.
[10] N. V. Kukhtarev, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, **2**(1976), 438.
[11] M. B. Klein, R. K. Jain and G. C. Valley, *Journal de Physique, Colloque C2, supplément au n°3, Tome 44*, C2-149(1983).

APPLICATION OF Fe-DOPED LiNbO₃ CRYSTAL DEGENERATE FOUR-WAVE MIXING IN OPTICAL IMAGE PROCESSING

ZHANG HONG-JUN DAI JIAN-HUA WANG PENG-YE GAO CUN-XIU

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

LU TUAN-SUN LIU WEN-HU

(*Department of Physics, Fujian Normal University*)

XU LIANG-YING

(*Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

This paper reports a degenerate four-wave mixing effect in Fe-doped LiNbO₃ crystal at low laser power (He-Ne laser, $\lambda=6328 \text{ \AA}$). The experimental curves about intensity of conjugate wave vs. irradiate time at different pump power is given. The phase-compensated property of the conjugate wave was examined, and the phase distortion image was corrected by means of this property. The experimental results obtained agree with the theory.