

# 光折变晶体 $\text{Cu}:\text{KNSBN}$ 的多重图像存贮 实验研究\*

汤安东 李育林 孔玉娥 赵明君

(中国科学院西安光机所, 西安 710068)

**摘要** 目前,光折变非线性元件在光学并行图像处理中有着非常广泛的应用。光折变晶体用于图像边缘增强,图像加、减运算,非相干—相干转换(PICOC),图像相关和卷积运算等研究已取得显著成果。本文研究了  $\text{Cu}:\text{KNSBN}$  晶体中多重图像的存贮问题,指出可以利用这种技术实现光学目标识别并给出了一些初步实验结果。此外,还从理论上分析了具有相同衍射效率的多重全息信息记录技术。

关键词:光折变效应;全息存贮;体积光栅

## 1 引言

近年来,非线性光折变材料已被广泛使用在高容量并行信息处理<sup>[1]</sup>、光计算<sup>[2]</sup>等领域方面。光折变晶体由于具有大容量的信息存贮能力、低的读写功率、高灵敏度、高衍射效率以及可擦除等特点可作为三维全息记录材料用于光学关联存贮<sup>[3]</sup>、和光互连结构<sup>[4]</sup>。

关于光折变晶体的多重全息存贮研究,在早期 D. L. Staebler 等人<sup>[5]</sup>报道了用  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  材料记录了高达 500 幅的全息图;J. P. Huignard 等人<sup>[6]</sup>研究了  $\text{Fe}:\text{LiNbO}_3$  晶体中多重全息记录的相干部分擦除问题。最近, A. C. Strasser 等人<sup>[7]</sup>用  $\text{LiNbO}_3$  晶体记录了 20 幅全息图并且每幅的衍射效率相等。

本文研究了  $\text{Cu}:\text{KNSBN}$  晶体中多重图像的存贮问题并给出了一些初步实验结果。此外,在理论上给出了一种实现具有相同衍射效率的多重全息信息记录技术。

## 2 光折全息存贮原理

光折晶体的实时全息存贮是利用了光折变效应即光致折射率变化效应(Photo-induced refractive index change effect<sup>[8]</sup>)。其含义是:晶格结构中的物理缺陷(某些晶格结点上丢失原子),置换杂质原子(在某个晶格结点上的外来原子)或间隙杂质原子(夹在晶体原子间的外来原子)致使缺陷杂质成为电光晶体中的施主和受主中心。当晶体在空间调制光或非均匀光照射下,它们被光激发进入最邻近的能带。在能带中载流子由于种种物理机制(扩散、漂移、光生伏

收稿日期:1993年2月3日

注:\* 本课题得到应用光学国家重点实验室的资助

特效等)而移动,经激发、俘获、再激发、再俘获后电荷就从亮区扩散出来而在暗区集结。这些光致分离的载流子在晶体内部可形成高达  $10000\text{V}/\text{cm}^{(9)}$  的空间电场分布。这种空间电荷场会使晶格结构发生轻微的变形,从而改变晶体材料的折射率分布;而这种折射率的变化反过来又对各光波的传播和空间特性进行非本地场调制。图 1 说明了光折效应的形成过程,图 2 是电光晶体中载流子的激发及俘获原理图。

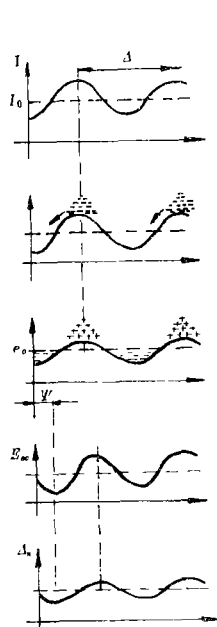


图 1 光折变效应原理图

照射光场分布

$$I(x) = I_0(1 + \cos kx)$$

光生载流子分布

$$n(x) = n_0(1 + m \cos kx)$$

↓ 运动

空间电荷分布

$$e(x) = \int_0^t \frac{dJ}{dx} dt$$

空间电场分布

$$E_{sc}(x) = \int_0^x \frac{e}{\epsilon} dx$$

折射率调制

$$\Delta n = n_0^3 \gamma E_s$$

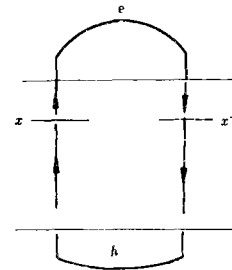


图 2 电子空穴运动能带示意图

理论上光折存贮器其存贮能力是:  $\frac{V}{\lambda^3} \text{bits}^{(10)}$ 。其中,  $V$  为光折变晶体的体积,  $\lambda$  为光波长。利用电控改变记录光的方向、偏振态特性以及光电混合互连技术就很容易地实现存贮的电寻址。当一块折射率已经改变的晶体不受任何光源照射时,根据材料的不同折射率的变化可以保持几毫秒至若干年<sup>(9)</sup>。在均匀的光照射下,这种折射率的调制分布又可以被擦除掉。正是由于具有上述特点,光折晶体三维存贮器现已被广泛地应用于光学信息处理系统中。

### 3 多重图像存贮实验结果及讨论

我们采用铜掺杂的铌酸钾钠锆钽晶体,即:  $(\text{K}_x\text{Na}_{1-x})_{2z}(\text{Sr}_y\text{Ba}_{1-y})_{1-z}\text{NbO}_3$ 。其成份含量是  $x = 0.5, y = 0.75, z = 0.1$ ; 掺  $\text{Cu}^{2+}$  含量是  $0.05 \text{wt}\%$ 。其大小为  $c \times a \times b = 7.5 \times 5.00 \times 5.0 \text{mm}^3$ , 用 Lambda-9 分光光度计测得其光谱透过率曲线表明:  $\text{Cu}:\text{KNSBN}$  晶体在蓝绿 ( $400\text{nm} - 560\text{nm}$ ) 波长范围内有较大的吸收。

实验测试表明我们所使用的  $\text{Cu}:\text{KNSBN}$  晶体的入射光强  $2\text{mW}/\text{mm}^2$  的条件下,其记录时间  $\tau_r < 10(\text{s})$ ; 擦除时间  $\tau_e > 30(\text{min})$ 。因此这是一种较好的实用信息存贮材料。

图 3 是利用  $\text{Cu}:\text{KNSBN}$  光折变晶体作实时全息干涉记录的再现实验结果图。图 3(a) 图 3(b) 采用的是二个不同物(“+”和“E”), 图 3(c) 是两个相干物(“E”)的全息干涉记录, 其中图 3(a) 中右边“+”为衍射再现像, 图 3(b) 中左边“E”为衍射再现像, 图 3(c) 中右边“E”为衍射再现像。显然, 只有用具有相同信息的光束干涉并再现时, 说明当用与被存物相同的光再现时, 所

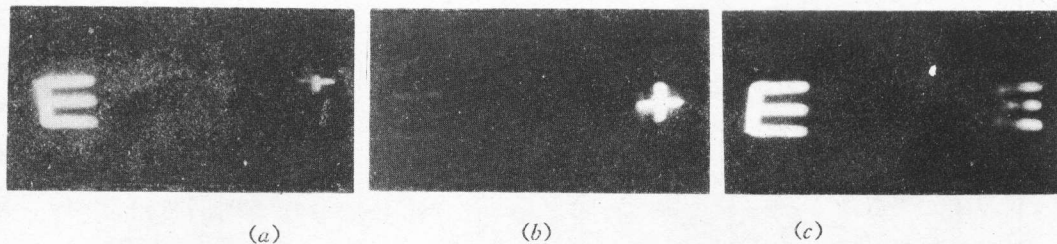


图3 衍射像照片

得衍射再现图像最清晰、强度最大。我们期望这一特性可在光学模式实时识别中得到应用。

图4是可实现多重全息曝光的实验光路图。我们采用双物—参考光同时记录的方法。由于光束间夹角均大于 *Bragg* 选择角 (*Bragg selectivity angle*), 因此衍射的再现像之间不会发生相互干扰。图5(a); 图5(b)分别为用各自相对应的参考光再现时的结果图, 其中的衍射再现像最清晰。实验结果清楚地说明: 衍射再现像之间没有相互干扰。记录时轻微转动晶体(每次的转动角大于 *Bragg* 选择角), 同时改变不同的物光(即改变待存贮的信息), 就可实现对不同物的多重全息曝光。

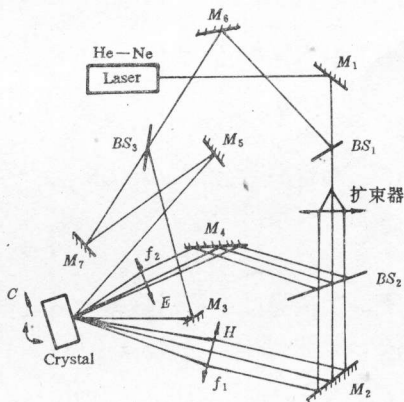
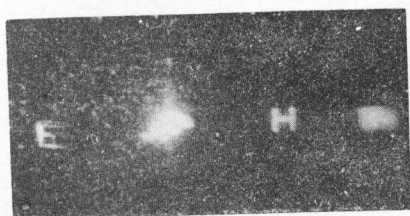
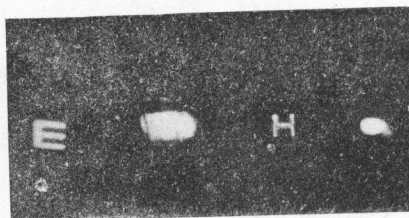


图4 实验装置图

#### 4 相等衍射效率的多重全息记录技术



(a)



(b)

图5 多重图像存贮实验结果

光折变晶体多重图像存贮技术的一个潜在难题在于用相同光强记录的全息图再现出的图像具有不同的亮度: 即各全息图的衍射效率不同。由于光折变材料中空间电荷根据不同的光场会重新分布, 因此在多重曝光过程中, 每记录一幅新的全息图, 它都会部分地擦除前面已经记录的全息图。在体光栅重叠区域中, 后记录的全息图的再现像要比先前记录的全息图的再现像亮得多。本文在理论上就如何补偿这种记录过程中的擦除作用进行了初步的探讨。

在  $t$  时间曝光后,光折晶体中空间电荷场分布为:

$$E_{sc} = E_0[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_r})] \quad (1)$$

式中  $E_0$  为材料的饱和空间电荷场强,亦即曝光时间  $t \rightarrow \infty$  时,  $E_{sc}$  值。上述全息记录经时间  $t'$  的擦除作用后,空间电荷场的分布为:

$$E_{sc} = E_0[1 - \exp(-\frac{t}{\tau_r})] \cdot [\exp(-\frac{t'}{\tau_r})] \quad (2)$$

设总曝光次数为  $N$ ,第  $j$  次的曝光时间为  $t_j$ ,则  $t_{j+1}, t_{j+2}, \dots$  至  $t_N$  的时间总和为擦除时间,第  $j$  幅全息图的空间电荷场应为:

$$E_{scj} = E_0[1 - \exp(-\frac{t_j}{\tau_r})] \cdot \exp[-\sum_{i=j+1}^N \frac{t_i}{\tau_r}] \quad (3)$$

由 H. Kogelnik<sup>[11]</sup> 的理论得知,光折三维光栅的衍射效率表示为:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta}\right) \quad (4)$$

其中折射率调制度  $\Delta n$  定义为:

$$\Delta n = \frac{1}{2} n^3 \gamma_{33} E_{sc} \quad (5)$$

式中  $n$  为折射率,  $\gamma_{33}$  为有效电光系数。一般情况,  $\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta}$  项较小, (4) 式可展开成:

$$\eta = \left(\frac{\pi d}{2 \lambda \cos \theta} n^3 \gamma_{33}\right)^2 E_{sc}^2 \quad (6)$$

要使每个全息图的衍射效率相等,即对任意的  $j$  和  $k$  使  $\eta_j = \eta_k$ , 只要使  $E_{scj} = E_{sck}$  即可。

不失一般性,令  $E_{scj} = E_{scj+1}$  可得:

$$\left[1 - \exp\left(-\frac{t_j}{\tau_r}\right)\right] \exp\left(-\frac{t_{j+1}}{\tau_r}\right) = \left[1 - \exp\left(-\frac{t_{j+1}}{\tau_r}\right)\right] \quad (7)$$

当  $\tau_r = \tau_r$  时,取  $t_1 \gg \tau_r$  由(7)式可解得:

$$t_j = \tau_r \ln\left(\frac{j}{j-1}\right) \quad j > 1 \quad (8)$$

按上述时间序列进行曝光,即可得到相等衍射效率的全息体光栅。

当  $\tau_r \gg \tau_r$  时(本文所用  $Cu:KNSBN$  晶体就属于这类材料), (7) 式可简化为:

$$\exp\left(-\frac{t_{j+1}}{\tau_r}\right) - \exp\left(-\frac{t_j}{\tau_r}\right) = \exp\left(-\frac{t_{j+1}}{\tau_r}\right) - 1 \quad (9)$$

(9) 式的解析解很难求出,一般需要进行数值迭代计算。

本文只是简单地就有关光折晶体等衍射效率的全息存贮问题的两种特殊情况进行了讨论。实际工作中晶体表面反射、入射光束的不同夹角以及晶体对光的吸收等因素会影响体积光栅的建立和衍射。有关这方面的实验研究有待深入进行。

感谢中科院长春光机所翁兆恒研究员、廖江红博士及梁玉华先生所给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] J. O. White and A. Yaruv, Appl. Phys. Lett., Vol. 37, 5 (1980)
- [2] P. Yeh, A. E. Chiou et al., Opt. Eng., Vol. 28, 328 (1989)
- [3] D. Z. Anderson and D. M. Lininger, Appl. Opt., Vol. 26, 5031 (1987)

- [4] R. Mecer, J. Wilde et al., Proc. Soc. Photo—Opt. Instrum. Eng., Vol. 881, 192(1988)
- [5] D. L. Staebler, W. J. Burke et al., Appl. Opt., Vol. 14, 182(1975)
- [6] J. P. Huignaed, J. P. Herriau and F. Micheron, Appl. Phys. Lett., Vol. 26, 256(1975)
- [7] A. C. Strasser, E. S. Maniloff et al., Opt. Lett., Vol. 14, 6(1989)
- [8] A. Ashkin, A. Bodey, G. D. Dziedzic et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 9, 72(1966)
- [9] D. M. Pepper, J. Feinberg, N. V. Kuthtarev, Scientific American, Vol. 263, No. 4(1990)
- [10] D. Psaltis, D. Brady and K. Wagnrr, Appl. Opt., Vol. 27, 1752(1988)
- [11] H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J., Vol. 48, 1909(1969)

## **Experiments on Multi—image Storage in Photorefractive Crystal Cu—doped KNSBN**

Tang Andong, Li Yulin, Kong Yue and Zhao Mingjun

*(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)*

### **Abstract**

Recently, photorefractive nonlinear devices are widely used in the field of highly parallel image processing. Photorefractive devices are notably demonstrated in image edge enhancement, image addition/subtraction, photorefractive incoherent—to—coherent optical converter (PICOC), image correlation/convolution and soon this paper, describes our study on multi—image information storage in Cu—doped KNSBN crystal bulk, points out that this technique can be possibly used in optical pattern recognition and shom some results. Moreover, the paper also represents a theoretical analysis on the technology of multi—image holographic recording with equal diffraction efficiency.

Key words; Photorefractive effect, Holographic information storage, Volume grating