

文章编号: 0258-7025(2001)01-0055-04

## 光折变位相图<sup>\*</sup>

温海东 刘思敏 张心正 郭 儒 张国权 孙 骞 许京军 张光寅

(南开大学物理系 天津 300071)

**摘要** 提出并实验证明了一种利用光折变效应制作体位相图的新方法。这种体位相图是可见的。该方法具有实时、简便等优点。在集成光学和光学信息处理中具有重要的应用前景。

**关键词** 光折变, 位相图, 体位相图

中图分类号: O 438 文献标识码: A

### Photorefractive Phase Mask

WEN Hai-dong LIU Si-min ZHANG Xin-zheng GUO Ru

ZHANG Guo-quan SUN Qian XU Jing-jun ZHANG Guang-yin

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** A new method of making phase mask in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal by photorefractive effect was demonstrated. This kind of phase masks are visual. It is a real-time and simple method that can be used to make many kinds of complex phase masks in integrated optics and optical information process.

**Key words** photorefractive, phase mask, volume phase mask

## 1 引 言

在光学信息处理中,为了获得载有一定信息的输入信号,通常是在均匀的平面入射波中插入振幅掩模(振幅图或称透明片),它的透过率分布与输入信息相对应。这种方法简便、易行但缺点是损失了大量的光能,较强的光源只能得到较弱的输入信号,这直接影响到输出信号信噪比的提高。为此,长期以来人们一直在寻求一种能够简便、高效地获得输入光信号的方法。位相物体(位相图)是一种只改变入射波位相而不改变入射波振幅的物体。因为这种物体是处处透明的,所以它对入射光没有吸收,不会引起入射波能量的损耗,但由于它的光学厚度(即折射率 $\times$ 几何厚度)是不均匀的,它会引起入射波位相的变化。因此,用纯位相物作为输入信号的光学相关器会获得比用振幅掩模作为输入信号时更为尖锐的相关峰,更高的识别能力和光效率<sup>[1]</sup>。另外,位相图在非线性光学中也有许多应

用,例如,为了激发奇数个暗空间孤子和涡旋孤子,必须使用位相掩模来产生相应的暗迹。为了在光纤中写入布喇格光栅,有时也需要使用位相掩模。但是,在光学信息处理的大多数情况下,还是需要输入光强信号,如果能够设法使位相物中的位相分布(即折射率或厚度分布)方便地转化为光强分布,便可利用位相图来空间调制均匀的入射光,得到所需的光强信号,从而达到用位相图代替振幅图无光能损耗地进行光学信息处理的目的。这显然提出了两个问题(1)如何根据输入信息的要求制作位相图?(2)如何将位相图成像?第一个问题是如何将要输入的光强信号转化为位相图中的位相分布,第二个问题是如何将位相图中的位相分布转化为光强分布。从而构成了一个问题的两个方面。

对于第一个问题,以往制作位相图的方法多是在记录介质(照相胶片或干版)上拍照,再通过显影、定影、漂白处理后方可得到位相图。它的难度虽不大,但比较繁琐,不能实时处理。对于第二个问题,为了使位相物可见,人们早就提出了暗场法、纹影法,但最为有效的是 1935 年泽尼克(Zemike)提出的相衬法,它通过在空间频谱面处对零阶频谱

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(69878009, 69678018 和 60078013)资助课题。

收稿日期: 1999-07-11; 收到修改稿日期: 1999-09-24

插入一个相衬器,便可在像面处得到一个与位相物中的位相变化成正比的强度分布像。

本文提出一个全新的方法,即将这两个问题结合在一起,利用光折变效应一次完成。具体地说,如果需要制作某种位相图,只要事先绘制出相应强度分布的振幅图作为输入掩模,将其成像在光折变晶体薄片上,辐照适当时间后,输入的强度信号便会以相应的折射率变化被复制到该晶体中,得到了所需的位相图。这种位相图是可见的。将此位相图作为输入物,在其像面处可以直接观察到与其位相变化相关的强度像,而不需要另外附加任何相衬器。

本方法还可应用于制作某些位相元件,如位相波带片、透镜阵列及其他位相元件乃至整个集成光路。

## 2 制作原理

在光折变效应中,光折变引起的折射率改变  $\Delta n$  正比于空间电荷场  $E_{sc}$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 r_{\text{eff}} E_{sc} \quad (1)$$

在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中,光生载流子的迁移机制主要是光生伏打效应。空间电荷场、入射光强  $I$  与暗辐照  $I_d$  之间的关系是<sup>[2]</sup>

$$E_{sc} = E_p \frac{I}{I + I_d} = E_p \left[ 1 - \frac{I_d}{I + I_d} \right] = E_p \left[ 1 - \frac{1}{1 + I/I_d} \right] \quad (2)$$

当  $I < I_d$  时,由幂级数展开式可近似得到

$$E_{sc} \approx E_p \frac{I}{I_d} \quad (3)$$

其中  $E_p = \frac{G\gamma N_A}{q\mu}$  为最大光生伏打场, $G$  为光生伏打常数, $\gamma$  为俘获截面, $N_A$  为负电荷数密度, $K(x,y) = |A(x,y)|^2$  为载信息的输入光强, $I_d = \beta/s$  为暗辐照,它可以通过非相干均匀光辐照来改变,其中  $\beta$  为热激发速率, $s$  为光激发截面。

因为位相变化  $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot L$ ,其中  $\lambda$  为入射波长, $L$  为晶体的通光长度,由(1)(3)式可知,当  $I < I_d$  时  $\Delta n \propto I$ ,因而可以将输入的光强信号  $K(x,y)$  线性转化为位相变化  $\Delta\phi(x,y)$ 。由图 1 中的  $E_{sc}/E_p - I/I_d$  的关系曲线可以看到,在  $I < I_d$  时, $E_{sc}/E_p - I/I_d$  的关系近似为线性。因此,对于需要将入射光强变化线性地转化为位相变化的情况,可以适当地增大  $I_d$  (通过非相干均匀辐照),或减小

$K(x,y)$ ,即满足  $I < I_d$  的条件,就可以使得  $E_{sc}$  乃至  $\Delta n$  与  $K(x,y)$  的关系处于线性区域,得到与入射强度变化成正比的位相变化,所以该区域也可称为“模拟记录区”。实际上,一般的输入振幅图都是二元的,即或亮或暗,没有灰度变化,因而此时只要求亮区与暗区的位相变化有尽可能大的差异即可,在这种情况下,可以采用数字位相记录方法,并没有必要要求  $\Delta n$  与  $K(x,y)$  的线性关系。由图 1 可知,对于辐照暗区,  $I = 0, E_{sc}/E_p = 0$ ; 对于辐照亮区,  $I \gg I_d, E_{sc}/E_p = 1$  相应的  $\Delta n$  接近饱和值  $\Delta n_s$ ,即采用数字法记录位相变化,可以写入阶跃型波导。正如在图 3 中看到的,在这种情况下,仍可得到满意的位相图。而且这种数字法记录方式可有效地抑制噪音的影响,提高信噪比。

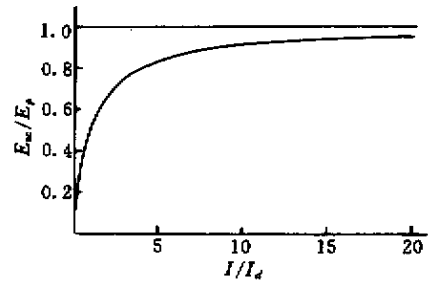


图 1 在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中  $E_{sc}/E_p$  与  $I/I_d$  的关系曲线

Fig.1 Curve of  $E_{sc}/E_p$  as a function of  $I/I_d$  in

$\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal

## 3 实验方法与结果

制作位相图的实验装置如图 2 所示。来自 He-Ne 激光器的激光束(输出功率约为 20 mW,偏振方向平行于晶体  $c$  轴( $e$  光)),经空间滤波器  $P$  扩束、滤波并准直后,插入振幅掩模  $O$ ,先不放晶体, $O$  通过透镜  $L_1$  和  $L_2$  成像在屏  $S$  上,如图 3(a) 所示。然后在  $O$  通过  $L_1$  成像的像面处放上  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  光折变晶体(晶体的通光长度约 2 mm 厚,平面尺寸约为 10 mm × 10 mm)。通过光折变效应,在晶体中写入位相图。依赖于输入光强,辐照适当时间后,将振幅掩模撤掉,在原光路上,用较弱的均匀光辐照晶体  $C$ ,它的出射面通过透镜  $L_2$  成像在屏  $S$  上,其像面上便会出现与入射的振幅掩模强度互补的图像。如果需要改变  $I_d$ ,在写入位相图的同时,由另一激光器输出的激光通过扩束后均匀辐照在晶体上,作为  $I_d$ 。我们的实验没有附加的  $I_d$ ,且输入的振幅掩模是二元振幅输入图像,所以在此情况下亮

区相应的  $\Delta n$  接近饱和值  $\Delta n_s$  ,暗区折射率不变 ,从而用数字记录方法写入了阶跃型波导。用均匀光读

出该位相图得到了图 3 ( b ) 所示的实验结果。写入和读出波导的过程如图 4 所示。

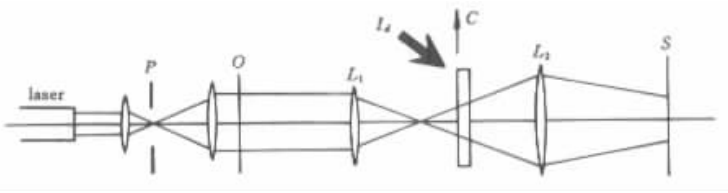


图 2 制作光折变位相图的实验装置

Laser :He-Ne 激光器 ; P :空间滤波器 ; O :振幅 mask ;  $I_d$  :均匀背景光 ;  $L_1, L_2$  :成像透镜 ; C :LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体 ; S :成像屏

Fig.2 Experimental setup of fabricating photorefractive phase mask

laser : He-Ne laser ; P : spatial filter ; O : amplitude mask ;  $I_d$  : homogeneous background light ;

$L_1, L_2$  : imaging lens ; C : LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal ; S : imaging screen

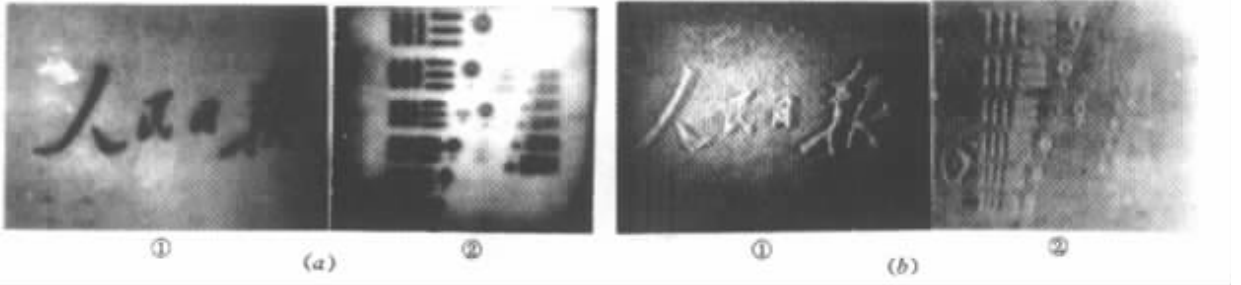


图 3 用两种输入图形在光折变晶体 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 中制作的位相图

( a ) 输入振幅图像 ( b ) 位相图的输出像

Fig.3 Phase masks in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystal fabricated by two kinds of input amplitude masks

( a ) input amplitude masks ; ( b ) output images of phase masks

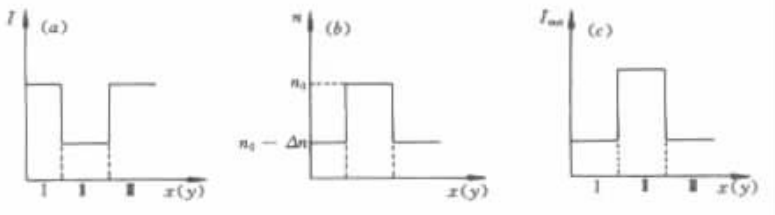


图 4 用二元振幅掩模输入图像时写入和读出光折变位相图的示意图

( a ) 写入光  $I(x, y)$  的光强分布 ( I , III : 亮区 ; II : 暗区 ) ( b ) 通过光折变效应写入波导 ;

( c ) 读出光在位相图出射面处的光强分布 ( I , III : 写入亮区 ; II : 写入暗区 )

Fig.4 Sketch of writing and reading phase mask using binary amplitude mask

( a ) Intensity distribution of writing light  $I(x, y)$  ( I , III : bright area ; II : dark area ) ( b ) Waveguide written due to photorefractive

effect ; ( c ) Output intensity distribution of the phase mask for read-out ( I , III : writing bright area ; II : writing dark area )

### 4 讨论

#### 4.1 体位相图成可见像的物理原因

由 ( 1 ) 式 ( 2 ) 式可知 , 写入体位相图时晶体入射面处辐照亮区由光折变效应引起的折射率改变为  $\Delta n$  , 而辐照暗区的折射率不变。因为在 LiNbO<sub>3</sub>:Fe 晶体中 ,  $\Delta n < 0$  , 所以暗区的折射率  $n_2$  高于亮区的折射率  $n_1$  , 如图 5 所示。这样 , 在用均匀光读出

该体位相图时 , 写入时为暗辐照的区域 , 因为折射率是均匀的 , 并高于周围的折射率 , 形成波导 , 进入波导中的读出光在波导中通过多次全内反射传播 , 因而在出射面处是亮的 ( 图 5 中光线 1 ) 。在写入时为亮辐照区的区域 , 由于折射率低于暗区 , 读出时以一定倾角入射到亮区的光线在到达与暗区交界处会发生折射。由于它们在波导中的折射角小于

$\alpha_c$  会经过数次折射而逸出晶体(图5中的光线2),因而在出射面处是暗的。入射到写入时亮区与暗区交界处的光线,由于折射率的不均匀性还会使读出光发生衍射,衍射角越大,它在  $n_1/n_2$  界面处的入射角  $\alpha$  便越小(图5中的光线3),而  $n_1$  与  $n_2$  之比决定了在  $n_2$  区内发生全内反射的临界角  $\alpha_c (= \sin^{-1}(n_1/n_2))$ 。对于进入  $n_2$  区的较低阶衍射光(同光线1),如果它们在  $n_1/n_2$  界面处的入射角大于或等于  $\alpha_c$ ,即满足全内反射条件,这些衍射光便被陷获在  $n_2$  区波导内,并通过全内反射在  $n_2$  区内传播,因而它增强了  $n_2$  区出射面处的光强,使其光强变得更亮。而进入  $n_2$  区内,不满足全内反射条件的较高阶衍射光则会通过数次在  $n_1/n_2$  面处折射最后逸出晶体界面而损耗(同光线2)。因此,在体位相图的像中我们看到,写入时的暗区变亮,写入时的亮区变暗,在写入时的亮-暗区交界的边缘处最暗,因为那里的衍射光或进入  $n_2$  区并在  $n_2$  区内向前传播,或通过折射逸出晶体(图3(a,b))。

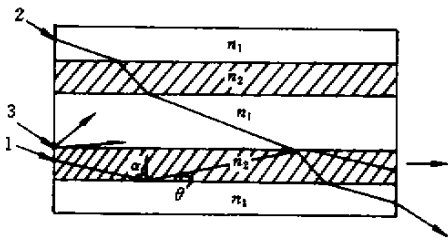


图5 读出光折变位相图时光线在写入波导中的传播

Fig.5 Propagating of light in waveguide when photorefractive phase mask is read

如果写入时亮区与暗区的间距足够小(如图3(a)中的分辨卡),则会发生相邻波导之间的光耦合,在相邻波导中的光场会发生交叠而产生能量转移,因而使图像模糊,如图3(a)(b)中右边的细结构。因为波导的模数  $M$  正比于波导的尺寸  $d$ ,所以用较细尺寸和图形结构之间间距适当的输入图形作为输入振幅掩模,写入的位相图效果更好。实验表明,间距和结构尺寸都大于  $3 \times 10^{-5}$  m,写入的位相图图形才可以分辨。

由于在自散焦介质中  $\Delta n < 0$ ,所以写入位相图时,输入振幅掩模应是亮背景下的暗图形,在自聚焦介质中则相反,应是暗背景下的亮图形。这才有可能使位相图中的波导对应输入的图形。这就是基于波导原理的体位相图成可见像的原因。

## 4.2 光折变各向异性对位相图的影响

由于光折变非线性存在着各向异性,这会导致二维输入图形写入的位相图的输出像发生一定程度的畸变,例如圆形输入图形会变成椭圆形<sup>[3]</sup>。对于  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体来说,平行于  $c$  轴方向与垂直于  $c$  轴方向感应的  $\Delta n$  会有所不同,这对写入二维体位相图带来困难。我们通过在  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  晶体中写入二维波导<sup>[4]</sup>及圆形和环形暗空间孤子写入波导的实验<sup>[5]</sup>及 Zhigang Chen 等有关漩涡孤子的实验报道<sup>[6]</sup>证明,这种各向异性明显地依赖于  $I$  与  $I_d$  之比,以及输入图形的形状和尺寸。实验证明在以上因素中存在着一组最佳参量,对应着圆形输出。另外还可以适当调节输入圆形的椭圆度,从而得到圆形输出。

## 4.3 固定

当体位相图作为输入掩模被插入到均匀平面波场中时,由于该波场是被扩束的激光束,能流密度一般很低,短时间辐照不会被擦洗掉。如果需要更长期保存,可以进行热固定或光固定。

## 5 结 论

利用光折变效应制作的体位相图的像是可见的,它可代替振幅图,并大大减少能量损耗。该制作方法也可应用于制作集成光路中的位相元件乃至整个集成光路。通过适当控制实验条件,可以解决光折变非线性的各向异性对制作位相图的保真度的影响问题。

## 参 考 文 献

- 1 M. Duelli, A. R. Pourzand, N. Collings *et al.*. Pure phase correlator with photorefractive filter memory. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(2) 3789
- 2 G. C. Valley, M. Segev, B. Crosignani *et al.*. Dark and bright photovoltaic spatial solitons. *Phys. Rev. A*, 1994, **50**(6) R4457R4460
- 3 B. Crosignani, D. D. Porto, A. Degasperis *et al.*. Three-dimensional optical beam propagation and solitons in photorefractive crystals. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(11) 30783090
- 4 Simin Liu, G. Q. Zhang, G. Y. Tian *et al.*. (1 + 1)-dimensional and (2 + 1)-dimensional waveguides induced by self-focused dark notches and crosses in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystal. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34) 89828986
- 5 Liu Simin, Yang Xiaoming, Tian Guoyun *et al.*. Circular and ring waveguides written and stored in  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  crystals. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47**(3) 432437 (in chinese)
- 6 Zhigang Chen, M. Segev, D. W. Wilson *et al.*. Self-trapping of an optical vortex by use of the bulk photovoltaic effect. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(15) 29482951