

光折变晶体作为相衬滤波器的研究

张静江 赵云英

(北京师范大学物理系,北京 100875)

徐玉恒 李铭华

(哈尔滨工业大学应用化学系,哈尔滨 150006)

摘 要 报道了利用各种不同的光折变晶体作为位相滤波器,实现位相型物体的可见和振幅型物体的对比度周期性反转等结果,并给出了统一的理论分析.

关键词 光折变晶体, 相衬法, 相衬滤波器.

1 引 言

过去在光学信息处理中,对于使位相型物体可见和振幅型物体的对比度反转、对比度改善、边缘增强等通常是分别进行的. 泽尼克(Zernike)相衬法也仅在讲述如何使透明物可见时加以介绍. 按作者的观点,从在傅里叶平面上对物的频谱进行改造的角度来分析,这些结果只是同一问题在不同条件下的不同表现,尤其当使用了光折变晶体,让它“自动地”成为一个“零频滤波器”后,更可将这些结果在同一个实验中显示出来. 本文对光折变晶体在相衬滤波器中的应用作进一步的研究.

2 泽尼克相衬法及其位相板

30年代初泽尼克提出了将物体的位相分布转换成光的强弱分布,从而能够被观察到,这种方法称为相衬法. 泽尼克在频谱面上使用的是一个零频衰减同时相移 90° 的位相板进行空间滤波,以使像的强度变化与物体的位相变化成线性关系. 泽尼克位相板的光学传递函数为:

$$H(f) = \begin{cases} \gamma \exp(\pm i\pi/2) & |f| < f_0 \\ 1 & |f| > f_0 \end{cases} \quad (1)$$

其示意图如图 1(a)所示.

在相衬显微镜中要特制一个“相板”,要求它对应某一入射光波长有确定的厚度和折射率,

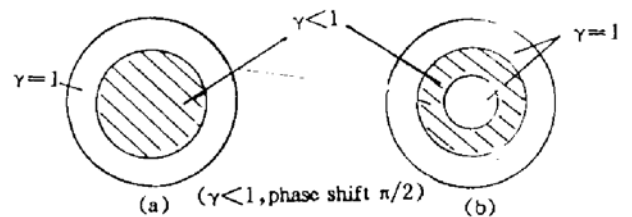


Fig. 1 Diagram of the phase filter

收稿日期:1992年9月17日;收到修改稿日期:1993年1月11日

* 国家自然科学基金资助课题.

放在傅里叶平面上的零频部位,这个特制的“相板”应是制成环状的,并要求与照明环的孔径相配.如图 1(b)所示.

3 用光折变晶体作相衬滤波器

铌酸锂晶体具有光折变性质,是一种实时记录材料,但其灵敏度很低,在实际应用中显得不够.掺入一些杂质后再进行还原处理,其灵敏度会大大提高.作者在拉制晶体时分别掺入铁、铈、铟、镁、锰,还有的是双掺;有的平行 C 轴、也有的垂直 C 轴切割,有的还进行了还原处理.作者把这些晶体应用到相衬法实验中,对各种因素对相衬滤波器的影响做了进一步的研究,为实际应用开拓了广阔的途径.

把光折变晶体放在输入物体的傅里叶平面上代替“相板”作为相衬滤波器.实验装置如图 2 所示,用这种实验装置不仅可以实现位相物体的可见,可见后对比度反转,同时还可直接使振幅型物体对比度反转,再反转,多次重复反转,边缘增强等.为了阐述其基本原理,设输入物体的复振幅为

$$\tilde{U}(x, y) = A(x, y) \exp [i\phi(x, y)] \quad (2)$$

式中 $A(x, y)$ 为输入物体的振幅空间分布, $\phi(x, y)$ 为位相空间分布, (2) 式的展开式为

$$\tilde{U}(x, y) = A(x, y) \left(1 + i\phi - \frac{1}{2!}\phi^2 - \frac{i}{3!}\phi^3 + \dots \right) \quad (3)$$

因为是在物的频谱面上放置了光折变晶体,它可以对物谱的零频部分提供一个位相变化 $\Delta\phi$ (详细分析见后),则在输出像面上的复振幅分布为

$$\begin{aligned} \tilde{U}(x', y') &= A(x', y') \left(e^{i\Delta\phi} + i\phi - \frac{1}{2!}\phi^2 - \frac{i}{3!}\phi^3 + \dots \right) \\ &= A(x', y') \left[(e^{i\Delta\phi} - 1) + e^{i\phi} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

输出像的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x', y') &= \tilde{U}(x', y') \tilde{U}^*(x', y') \\ &= |A(x', y')|^2 [3 + 2(\sin \phi \sin \Delta\phi + \cos \phi \cos \Delta\phi - \cos \phi - \cos \Delta\phi)] \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\phi \ll 1$ 时, $\cos \approx 1$, $\sin \phi \approx \phi$; 对纯位相物体 $|A(x', y')|^2 = A^2$ 为常数,则(5)式表示为

$$I(x', y') = A^2 [1 + 2 \sin \Delta\phi \cdot \phi(x', y')] \quad (6)$$

(6) 式表示像面上光强分布与物的位相分布成线性关系,不同的 $\Delta\phi$ 会导致不同的反衬度变化.当 $\Delta\phi = \pi/2$ 时,像的反衬度最大,这就是泽尼克位相板的要求.当 $\Delta\phi = \pi/2, 5\pi/2 \dots$ 时,可得正相衬;当 $\Delta\phi = 3\pi/2, 7\pi/2 \dots$ 时可得负相衬.由此可知,这种滤波器除了使位相物体可见外,在 $\Delta\phi$ 每改变一个 π 值时,就同时可实现位相物可见后的对比度交替反转.图 3 给出了实验结果.对于纯振幅型物体(如未经漂白的原始物),可由位相滤波器零频部份的 $\Delta\phi$ 每改变 π 值而导致其对比度的一次反转,也可出现周期性交替变化的结果.这一点从实验上和理论上都已获得证实.本实验使用的是掺 Ce 和 Fe 的铌酸锂晶体,厚度约为 2 mm.光源为波长 632.8 nm 的 He-

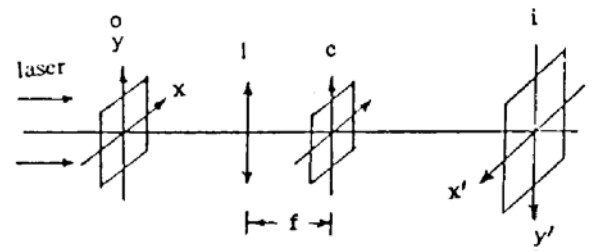


Fig. 2 Scheme of the experimental set-up

o-object plane; l-lens; c-crystal; i-image plane

Ne 激光器,输出功率为 3 mW.

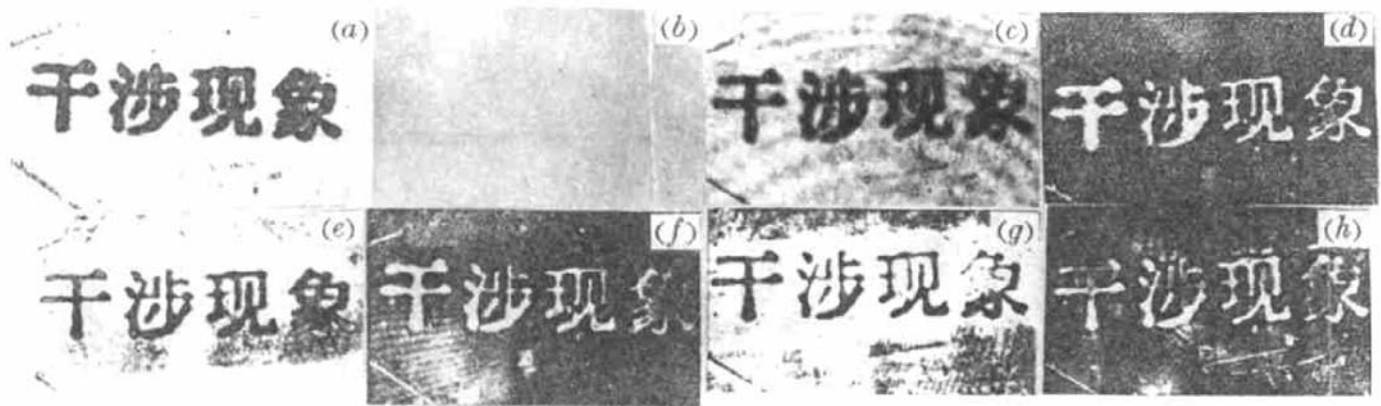


Fig. 3 Experimental results

a-original object; b-phase object (after bleaching); c-visualization of phase object; d-first reversed image of original object—positive contrast; e-second reversed image of original object—negative contrast; f-third reversed image of original object—positive contrast; g-fourth reversed image of original object—negative contrast; h-fifth reversed image of original object—positive contrast

光折变晶体怎样起到零频滤波的作用呢?这里巧妙地利用了晶体的非线性光学性质.因为对于一般物体可以证明在傅里叶平面上其频谱的中心部分集中了绝大部分的光能,即在频谱面上零频部分的光强分布远大于其它频率成分.而晶体所产生的位相变化 $\Delta\phi$ 在未达饱和值之前是随着入射光强而变的,因为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n \quad (7)$$

而

$$\Delta n \propto \frac{\pi\chi^{(3)}}{n} I \quad (8)$$

式中 d 为晶体厚度, λ 为入射光波波长, Δn 为折射率变化, n 为线性折射率, $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性极化率, I 为光强.所以在一般情况下其它频率成份的位相变化可以忽略.又由于晶体的积累效应在不同的中间时刻 Δn 也是时间 t 的函数,所以实际上 Δn 在达到饱和值之前是由曝光量 $E = It$ 决定的.因此可以简单地控制曝光时间(对脉冲激光器则是曝光次数)就可以得到不同的 Δn (因而 $\Delta\phi$).图3就是在不同的时刻摄下的实验照片.此外,因为采用的是激光平行光照明,零频部分就处在光学系统的中心部位,这样不需要特制的“相板”去准确地放置在合适的位置,晶体自动地成了一个“零频位相滤波器”.一次实验后只需移动一下晶体的位置就“等效于”又换了另一个滤波器.再加上晶体“永不疲劳”的特性,晶体的各部位都被使用后,经过擦除又可重新使用.这样一块晶片就相当于无数个相衬滤波器.

下面说明一下晶体的非线性吸收的作用,由于 ϕ 很小,(6)式中的第二项较第一项小很多,输出像有很强的本底,所以一般相衬显微镜都配有使零频部分光能衰减不同倍数的相板.计算表明,当采用使光能衰减 1/5 的相板时,输出像的衬度能够增大一倍.在本文的实验中并没有特意增加零频部分的吸收,但输出像却有较高的衬度,作者认为这是由于晶体存在某种非线性衰减特性,在频谱的中心部分光强远大于其它部分,衰减也远大于其它部分,这意味着在(6)式中第一项应乘上一个衰减因子 a ($a < 1$).这样,入射光越强,衰减越大,背景强度就越低.当然

衰减太强以致成了完全去掉零频的情况,就会出现“暗场法”的结果.而衰减更强,频谱面上的滤波相当于将零频和一部分低频成分都去掉,滤波器起了高通滤波的作用,就会出现边缘增强的效应,这些现象也在实验中被观察到了.

4 各种因素对图像质量的影响

在本文的实验中使用过多种晶体.如 Fe : LiNbO₃、Fe : Ce : LiNbO₃、Ce : LiNbO₃、Mg : LiNbO₃、Er : LiNbO₃、Ce : Mn : LiNbO₃ 等,即使同一种掺杂的晶体也还有掺杂量、厚度、还原程度、晶体切割方向的区别.现就这些因素的影响简述如下.

4.1 掺杂成份和掺杂量的影响

实验分别使用铁、铈、镁、锰、铪作为掺杂物质.发现掺铁的晶体灵敏度最高,掺铈的次之,其它三种更次之.而双掺杂铁、铈的晶体要更灵敏一些,可以在 2 分钟之内完成 10 次对比度反转.但用响应时间短的材料时图像的清晰度要差一些.

4.2 后期处理和晶体厚度的影响

实验中发现经还原处理的晶体响应快,确定的一段时间内对比度反转次数多,而未处理的和经氧化处理的晶体要比经还原处理的慢得多,相同时间反转次数要少得多.

从(7)式知 $\Delta\phi$ 与厚度 d 成正比,即愈厚的晶片响应时间愈短.众所周知晶体掺杂不可能做到非常均匀,因此厚的晶片作为滤波器虽然响应时间短,但清晰度却差得多.

4.3 晶体切割方向的影响

实验中发现,平行于 C 轴切割的晶片响应时间要比垂直 C 轴切割的晶片响应时间短得多,因而对比度反转变快.对于平行 C 轴切割的晶体使用非寻常光入射时晶体折射率的变化又比使用寻常光入射大得多.

4.4 光谱透过率的影响

从原则上讲,晶体的光谱透过率对实现相衬滤波是有影响的,采用不同波长的激光入射时,响应时间的长短、变化的速率都会不同.但因为相衬滤波的结果是入射光波长、偏振方向、入射光强、晶体厚度、掺杂成份、掺杂量、切割方向、以至晶体非线性吸收等的综合效应.由于这种非线性滤波的灵活性,即使是采用一种入射光,也不需首先考虑晶体光谱透过率的选择.图 4 是还原处理的 Fe : LiNbO₃、还原处理的 Ce : LiNbO₃、未经处理的 Ce : LiNbO₃ 的光谱透过率曲线.从图上看它们的光谱透过率差别很大,但它们同样可作为相衬滤波器使用.当然对于某一种晶体,采用哪一种波长的光入射,在什么样的强度范围内有最佳的效果,这是需要深入研究的问题.

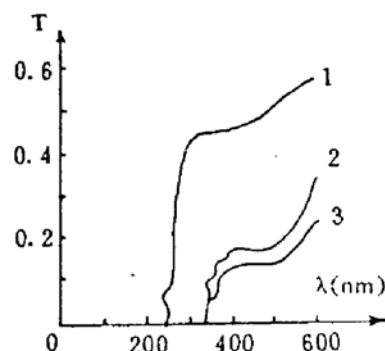


Fig. 4 Transmittance curve of photorefractive crystal

1-un-reduced Ce : LiNbO₂; 2-reduced Ce : LiNbO₃; 3-reduced Fe : LiNbO₃

5 结 论

利用晶体的非线性光学性质,用晶体薄片代替特制的位相板起零频滤波作用,不仅可以实现位相物体可见,而且可实现振幅型物体对比度反转,并可以有周期性变化. 整个处理过程简单方便,易于操作,是一种很有发展前途的空间频谱滤波手段,可制成一个相衬滤波器件,进而可以用来制成一种新型相衬显微镜.

参 考 文 献

- [1] M. 玻恩 E. 沃耳夫著,杨葭荪等译;光学原理,上册,北京 科学出版社,1978: 554~558
- [2] M. 弗朗松著,张炳勋译;相衬显微镜与干涉显微镜,北京 科学出版社,1966.
- [3] Philip S, Brody, Richard, P. Leavitt, Dynamic holographic method of imaging phase objects. *Appl. Opt.* 1987, **26** (5): 913~916
- [4] N. J. Wooder, J. C. Dainty, Real time intensity inversion by four wave mixing in bismuth silicon oxide. *Opt. Commun.* 1987, **63**(2): 85~88
- [5] Ng. Phu Xuan, J. L. Ferrier, J. Gazengel *et al.* , Changes in the space structures of light beams induced by nonlinear optical phenomena: Application to phase contrast and image processing. *Opt. Commun.* , 1988, **68**(4): 244~250
- [6] 张静江, 利用光折变晶体实现非线性空间滤波. 北京师范大学学报,自然科学版,1990,2: 31~35

Investigation on Photorefractive Crystals Using as Phase Filters

Zhang Jiangjiang Zhao Yunying

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Xu Yuheng Li Minghua

(Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

(Received 17 September 1992; revised 11 January 1993)

Abstract Various photorefractive crystals are used as phase filters. Theoretical analysis and experimental results are presented. The influences of different parameters on crystals which are used in phase contrast are discussed in more detail.

Key words photorefractive crystals, phase contrast, spatial filter.