

用 Fe:LiNbO₃ 的实时散斑错位干涉仪

王天及 范少武 张世超 李耀棠

(中国科学院广州电子技术研究所)

徐良瑛 束碧云 童乃柱

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

提要: 报道一种实时散斑错位干涉仪的实验室装置。采用 Fe:LiNbO₃ 晶体作散斑照相的记录介质。晶体掺 Fe 量为 0.1% 摩尔, 对 $\lambda=488\text{ nm}$ 波长的透过率 $<5\%$ 。进行散斑照相的同时在 Fe:LiNbO₃ 晶体上形成象全息图。用此装置可以实时地测量物体的形变以及进行实时无损检验。

Real time speckle shearing interferometer using Fe:LiNbO crystal

Wang Tianji, Fan Shaowu, Zhang Shichao, Li Yaotang

(Guangzhou Institute of Electronics Technology, Academia Sinica)

Xu Liangying, Su Biyun, Tong Neizhu

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

Abstract: This paper reports an experimental setup of real time speckle shearing interferometer. In the setup we use Fe:LiNbO₃ crystal as recording medium for the speckle photography. The transmissivity at $\lambda=488\text{ nm}$ is $<5\%$. The wedge angle of the shearing lens is 1° . The image hologram is simultaneously constructed on the Fe:LiNbO₃ crystal while the shearing speckle photography is taken by the shearing lens on the crystal. This setup can be used in measuring the deformation and real time nondestructive testing.

一、引言

目前全息和散斑照相普遍使用的卤化银照相材料虽然已是商品化,但在某些特殊场合合作实时记录来说,使用卤化银照相材料是十分不便的。我们采用铁电晶体 Fe:LiNbO₃ 作散斑错位照相的记录介质以实现实时化。

Fe:LiNbO₃ 晶体具有极好的分辨率和高的读出效率,存储容量大,具有可擦除记录信息的反复使用的特性,并且不需显影、定影的繁杂操作,可以直接记录观察等优点^[1]。因此在设计实时散斑错位干涉仪时我们选用 Fe:LiNbO₃ 晶体作记录介质。

收稿日期:1985年1月18日。

二、Fe:LiNbO₃ 晶体的特性

使用的 Fe:LiNbO₃ 晶体是中国科学院上海硅酸盐研究所拉制的^[2], 掺铁量为 0.1% 摩尔, 在 400~500nm 波长范围内的光吸收较大(见图 1)。

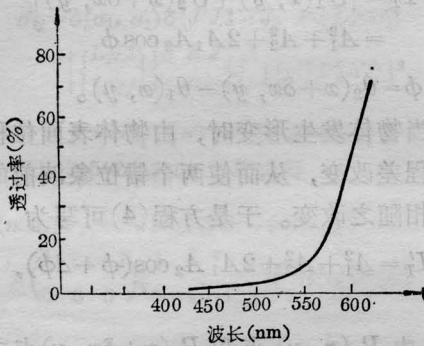


图 1 掺 Fe 量 0.1% 摩尔时 Fe:LiNbO₃ 晶体的光透过率

记录时 Fe:LiNbO₃ 晶片的 *c* 轴取水平位置, 光束的偏振方向与晶体 *c* 轴垂直。记录灵敏度可用光折射灵敏度来表示:

$$S = \Delta n / \Delta W_0$$

式中 Δn 为光折射率的变化, ΔW_0 为吸收单位能量密度。

Fe:LiNbO₃ 晶片内的散斑图是由光照后产生的空间电荷图象组成, 它们是在光的干涉图象中产生自由运动电子载荷子时形成的。这些载荷子向低光照区移动, 然后被陷阱捕获而产生净空间电荷图, 亦即形成一个相应的电场图象, 它是一个折射率变化的图象。由于 Fe 在 Fe:LiNbO₃ 晶体中含有一种感光电子陷阱, 散斑图样的存储是由于电子在这些陷阱中进行空间重新分布而发生的。被捕获的电子起初在整个晶体内均匀分布, 曝光后干涉光在被捕获的电子吸收时产生相应的电子图象, 电子向低光强区移动, 结果形成一个能产生合乎要求的折射率变化的电场图象。图 2 示出了 Fe:LiNbO₃ 晶体内散斑干涉图的存储过程。照射光使局部晶体缺

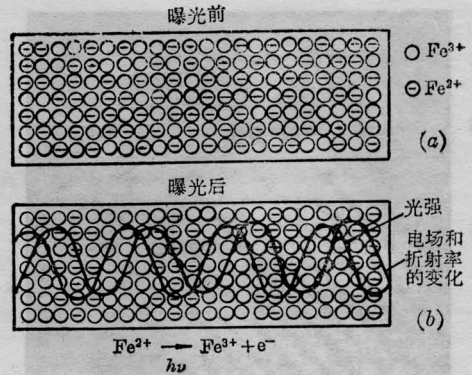


图 2 Fe:LiNbO₃ 晶体内散斑干涉图的存储过程

陷处捕获的电子重新分布, 形成的电场图象通过晶体的线性电光性能产生一个折射率变化的图象。

三、实验装置和结果

图 3 示出了实时散斑错位干涉仪的装置图。待测物的表面被氦离子激光照明, 由错位镜和成像透镜成象在 Fe:LiNbO₃ 晶片上。由 He-Ne 激光读出记录在 Fe:LiNbO₃ 晶片上的信息, 经过变换透镜, 在频谱面经高通滤波后, 进入 TV 摄像机。由监视器显示散斑错位干涉条纹。

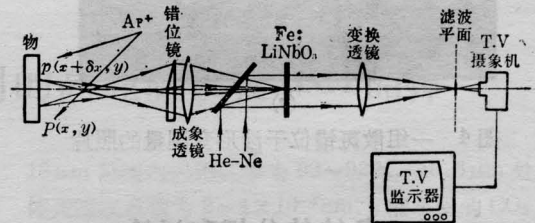
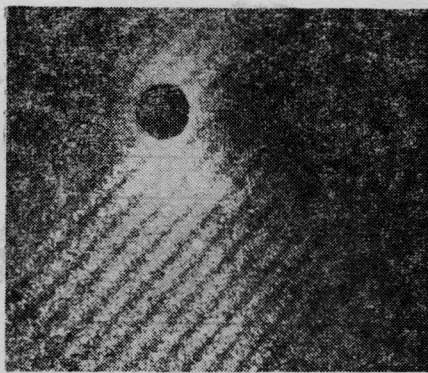
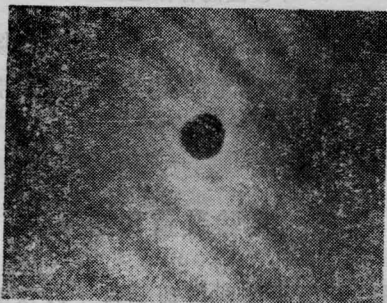


图 3 实时散斑错位干涉仪装置图

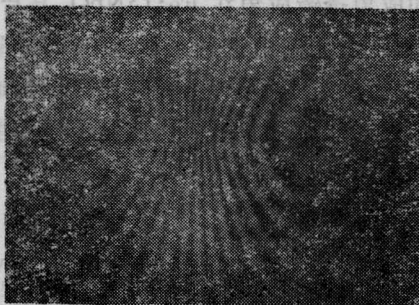
图 4 示出一组由实时错位散斑干涉仪得出的铝板形变条纹和位移梯度条纹, 其中 (a) 是铝板位移 30 μm 时用此装置记录在 Fe:LiNbO₃ 晶片上用常规逐点分析法获得的条纹; (b) 是位移 10 μm 的情况拍摄的; (c) 是在 TV 监视器上拍下的全场形变条纹。



(a)



(b)



(c)

图4 一组散斑错位干涉形变测量的照片

四、条纹的分析和讨论

目前,有关错位散斑干涉条纹的解释、滤波方式以及再现方法等尚有争议。根据对 Y. Y. Hung^[3] 所作分析的修正^[4], 设两个错位象的波前分别是

$$U_1(x, y) = A_1 \exp[i\theta_1(x, y)] \quad (1)$$

$$U_2(x + \delta x, y) = A_2 \exp[i\theta_2(x + \delta x, y)] \quad (2)$$

式中 $\theta_1(x, y)$ 和 $\theta_2(x + \delta x, y)$ 分别表示物体表面上由 $P_1(x, y)$ 和 $P_2(x + \delta x, y)$ 点来的光的位相, A_1 和 A_2 是来自 P_1 和 P_2 点的光的振幅。在象平面上的总光场是

$$U_T = U_1(x, y) + U_2(x + \delta x, y), \quad (3)$$

其强度是

$$\begin{aligned} I_T &= |U_1(x, y) + U_2(x + \delta x, y)|^2 \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\phi = \theta_2(x + \delta x, y) - \theta_1(x, y)$ 。

当物体发生形变时, 由物体表面位移引起光程差改变, 从而使两个错位象波前的相对位相随之改变。于是方程(4)可写为

$$I_T' = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi + \Delta\phi), \quad (5)$$

$\Delta\phi$ 是由 $P_1(x, y)$ 点和 $P_2(x + \delta x, y)$ 点之间相对位移而引起的相对位相变化。如果在象平面上相继记录了形变前的光强 I_T 和形变后的光强 I_T' , 那么, 总记录的光强是

$$\begin{aligned} I_S &= I_T + I_T' = 2(A_1^2 + A_2^2) \\ &\quad + 4A_1A_2[\cos \phi + \cos(\phi + \Delta\phi)] \\ &= 2(A_1^2 + A_2^2) + 4A_1A_2 \\ &\quad \times \cos\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \cos \frac{\Delta\phi}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

上式右边第二项描述了由低频因子 $\cos \frac{\Delta\phi}{2}$ 调制的由 $\cos\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$ 描述的高频载波振幅。在 $\frac{\Delta\phi}{2} = n\pi$, ($n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 即光程改变为 $n\lambda$ 的区域光强为

$$I_S \Big|_{\frac{\Delta\phi}{2} = n\pi} = 2(A_1^2 + A_2^2) + 4A_1A_2 \cos \phi \quad (7)$$

(7) 式表明载波最强是双曝光条纹亮区。然而, 在 $\frac{\Delta\phi}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$, 即光程改变为 $(2n+1)\lambda/2$ 的区域光强为

$$I_S \Big|_{\frac{\Delta\phi}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi} = 2(A_1^2 + A_2^2) \quad (8)$$

(8) 式表明载波为零是双曝光条纹的暗区, 是由两个互不相关的散斑图象迭加而成。

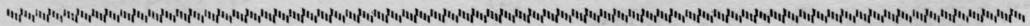
和普通干涉条纹图样不同的是,由式(6)所描述的是频率变化型的条纹图样。相对于 A_1^2 、 A_2^2 和 $\cos \frac{\Delta\phi}{2}$ 来说 $\cos\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right)$ 是快变的,故这种条纹图样经高通滤波后(图3)便可见到。

无论是根据 Y. Y. Hung 曾推导出的小的错位相对位移导数与位相变化的关系,或者根据文献[4]中对 Y. Y. Hung 描述的修改都附合本实验的实时散斑错位干涉照相的结果。显而易见,散斑错位干涉法,当使用 Fe:LiNbO₃ 晶体作其记录介质时,便能实时地记录散斑错位条纹图样,并可以全场实时

地观察。另一方面,由于错位镜的使用,物体上 $P(x, y)$ 点与 $P(x+\delta x, y)$ 点的光到达 Fe:LiNbO₃ 晶片上时互为参考光和物光而构成了象平面全息图。这样,在观察时就会更为方便。在自然光下便能观察到条纹图样,以便判断出被检测物缺陷的位置。

参 考 文 献

- [1] H. M. Smith; "Holographic Recording Materials", Springer-Ver lag, 1977.
- [2] 何雪梅等;《应用激光联刊》1982, 2, No. 4, 9.
- [3] Y. Y. Hung; *Opt. Engineering*, 1982, 21, No. 3 391.
- [4] 何毓宁;《光学学报》,1985, 5, No. 3, 241.



(上接第 294 页)

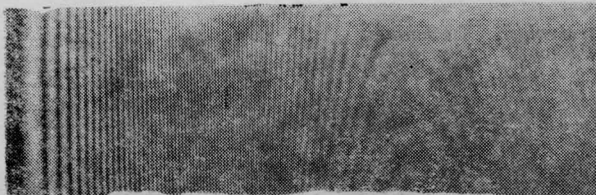


图 3 具有可变间距的干涉图形照片

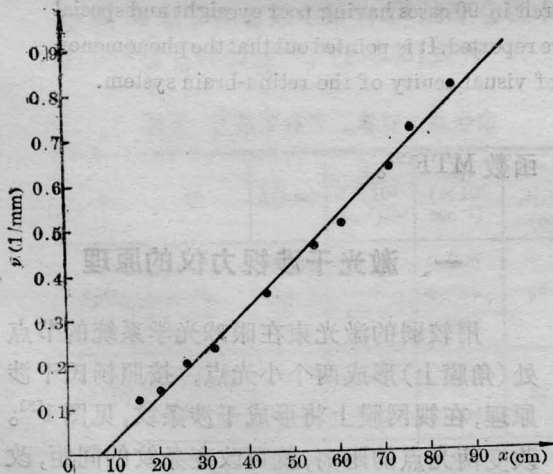


图 4 $\nu \sim x_i$ 曲线

四、讨 论

我们在导出柱面镜的厚度函数 $\Delta(x)$,

时,考虑到 $x \ll R$, 只取了 $(x/R)^2$ 的一次项而忽略了其余的高次项(见方程(4))。如果将 $(x/R)^2$ 的二次项也计算在内,则有:

$$\Delta(x) = \Delta_0 - \frac{x^2}{2R} + \frac{x^4}{8R^3} \quad (24)$$

进一步的计算表明,此时的光栅空间频率为:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \sin \alpha + \frac{(n-1)x_i}{\lambda[D(n-1) - R]} + \frac{(n-1)^2 x_i^2}{\lambda[(n-1)D - R]^2} \quad (25)$$

如果我们取 $n=1.51$, $\lambda=632.8 \text{ nm}$, $D=69 \text{ cm}$, $R=15 \text{ cm}$, $\alpha=17.3^\circ$, 得到:

$$\nu = 4.70 \times 10^2 + 4.00x_i + 5.04 \times 10^{-3}x_i^2$$

在 $x_i=25 \text{ mm}$ 处,由方程(18)计算得到 $\nu=570 \text{ 1/mm}$, 而由于非线性项引起的修正为 3 1/mm , 相对误差为 0.5% , 因此,我们认为忽略 $(x/R)^2$ 的高次项是完全合理的。

参 考 文 献

- [1] M. V. R. K. Murty; *J. Opt. Soc. Am.*, 1960, No. 1, 7.
- [2] M. V. R. K. Murty et al.; *Optical Engineering*, 1979, 18, No. 5, 523.