

文章编号: 0258-7025(2003)08-0713-04

光伏电场对大容量体全息存储的影响与抑制

刘国栋, 何庆声, 李晓春, 金洪震, 王建岗, 邬敏贤, 金国藩

(清华大学精密仪器与测量国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 Fe:LiNbO₃ 晶体有很强的光伏效应。通过理论分析和实验验证,在全息存储过程中,光伏效应会在晶体表面产生非均匀的光伏直流电场,它不仅降低了材料的动态范围,并且引起了 Bragg 失配,使得再现图像失真。消除光伏直流电场的方法是使用电解质溶液短路晶体表面电荷。采用这种方法,在晶体一个公共区域内,可存储 1000 幅能够清晰再现的全息图像。

关键词 信息光学;大容量体全息存储;光伏效应;光伏电场;光折变晶体

中图分类号 TN 26 **文献标识码** A

Suppression and Influence of Photovoltaic DC Field on Volume Hologram

LIU Guo-dong, HE Qing-sheng, LI Xiao-chun, JIN Hong-zhen,

WANG Jian-gang, WU Min-xian, JIN Guo-fan

(State Key Lab. of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A nonuniform photovoltaic field is created in Fe:LiNbO₃ during hologram recording exposures. Experimental results and analysis show the degradation of the volume holograms in the presence of the photovoltaic field. A sodium chloride solution is used to short-circuit the crystal to improve the stored images quality. 1000 holograms which can be reconstructed with high fidelity have been stored in a common volume of the crystal which was placed in the sodium chloride solution.

Key words information optics; multiplexing volume holographic storage; photovoltaic effect; photovoltaic DC field; photorefractive crystal

1 引 言

由于铌酸锂晶体暗电导率低、光折变灵敏度大,已被作为记录介质广泛应用于大容量体全息存储的研究中^[1,2]。该晶体另一个显著特点是具有很强的光伏效应^[3~5],Ashkin 等^[6]发现,如果均匀照射晶体的一部分,则在被照射区域的边界会产生一层面电荷,所形成的光伏电场通过电光效应可以改变被照射区域内晶体的折射率。文献[4]研究了光伏电场对稳态光栅衍射效率的影响。本文将通过实验证明和理论分析的方法讨论光伏效应对全息图读出图像质量

的影响,并提供一种提高读出图像质量的方法。

2 实 验

图 1 为经典的 90° 谱面全息存储方案装置图。记录晶体 Fe:LiNbO₃ (1.2 cm × 1.2 cm × 1.0 cm, 掺铁 0.05 mol-%) 经 45° 切割, C 轴与全息光栅矢量平行;激光波长 514.5 nm,物光与参考光均为 o 光,两者夹角近似 90°;物光光路中的空间光调制器 (SLM) 是 XGA2 MINIATURE LCD1024 × 768 液晶投影板。物光通过半波片 P₁, P₂, 反射镜 M₂,

收稿日期:2002-04-03;收到修改稿日期:2002-07-18

基金项目:国家重点基础研究项目 973(G19990330)和自然科学基金(No. 69978007)资助项目。

作者简介:刘国栋(1977—),男,江西人,清华大学精密仪器与测量国家重点实验室博士研究生。主要从事体全息存储的研究。E-mail:liugd99@mails.tsinghua.edu.cn

SLM, 透镜 L_3 和空间滤波器 D_1 到达晶体。 P_1 调整物光的偏振态与 SLM 的相同, P_2 调整物光的偏振态与参考光相同。参考光通过透镜 L_1 , 反射镜 M_1 及透镜 L_2 到达晶体, 其中 L_1 与 M_1 被固定在精密平台 S 上, 通过计算机控制 S 左右移动, 可精密调整参考光入射角度。参考光强度约 59 mW/cm^2 , 物光中的最大光强约 2.4 mW/cm^2 。在空气中参考光角度间隔 0.01° 存储一幅全息图。实验开始前, 晶体先经过充分的热擦除。

在置于空气中的晶体内存储了 300 幅全息图后, 观察第一幅全息图的再现像, 发现读出图像质量明显下降, 偏转参考光的入射角度 $\delta\theta = 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$, 全息图能清晰再现, 如图 2 所示。

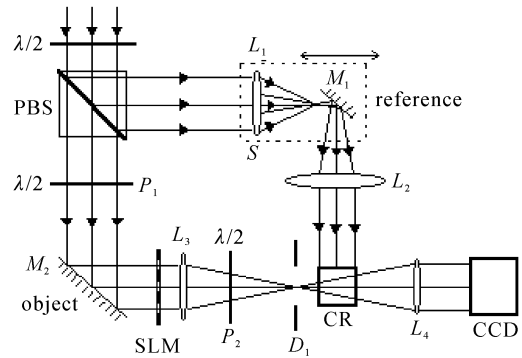


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic illustration of the experimental arrangements

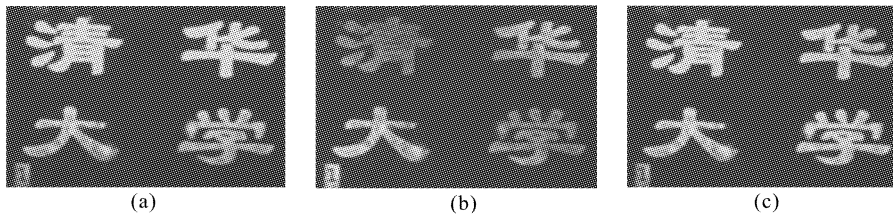


图 2 (a) 第一幅全息图刚刚存储时的读出效果; (b) 存储了 300 幅全息图后, 第一幅全息图的读出效果; (c) 和 (b) 是相同的全息图, 参考光入射角度偏转 $2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 的读出效果

Fig. 2 (a) Reconstruction of the first stored hologram just after its storage;

(b) Reconstruction of the first hologram after other 300 holograms were recorded;

(c) Reconstruction of the same hologram with the readout beams for picture making an angle of $2 \times 10^{-5} \text{ rad}$

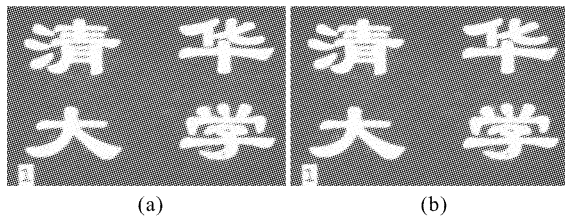


图 3 晶体放置于 NaCl 溶液中

(a) 第一幅全息图在刚刚存储后的读出效果;

(b) 第一幅全息图在存储 300 幅图像后的读出效果

Fig. 3 Crystal was in NaCl solution

(a) Reconstruction of the first stored hologram just after its storage; (b) Reconstruction of the same hologram after other 300 holograms were recorded

光伏效应导致了全息图再现像的质量下降, 使用 NaCl 溶液来抑制这种影响。NaCl 溶液不损伤晶体, 514.5 nm 波长的光学吸收率为 0.016 cm^{-1} 。图 3 为对比实验的结果, 同样存储 300 幅全息图, 第一幅全息图能够清晰再现。

另一方面, 光伏效应还影响了全息图像的衍射效率。如图 4 所示, 以每幅全息图曝光 3 s 的方法

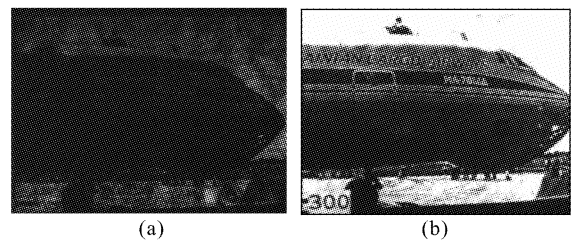


图 4 存储了 300 幅全息图后的最后一幅全息图的再现像

(a) 晶体裸露在空气中; (b) 晶体放置在 NaCl 溶液中

Fig. 4 Reconstruction of latest holograms after 300 holograms are stored

(a) in air where the crystal is;

(b) in NaCl solution where the crystal is

记录了 300 幅全息图, 发现图 4(a) 的衍射效率太小以至于不能辨认图像的形状。

而将晶体置于 NaCl 溶液中, 按照最后一幅全息图曝光 0.8 s , 平均每幅曝光 1.681 s 的时序, 在 0.216 cm^3 的公共体积内可存储 1000 幅全息图, 如图 5 所示。

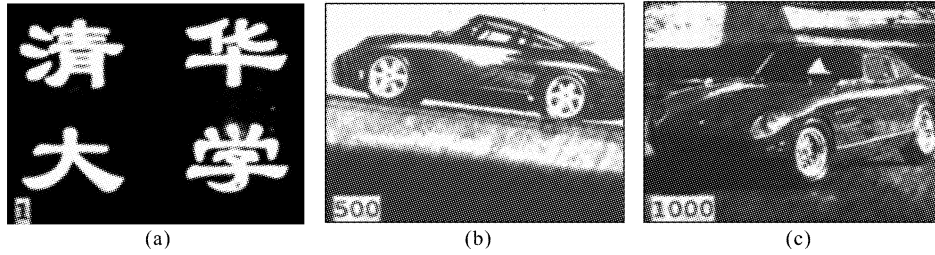


图 5 放置于 NaCl 溶液中的晶体内存储了 1000 幅全息图
(a), (b), (c) 分别为第 1, 100, 1000 幅全息图的再现图像

Fig. 5 Reconstructions of the 1st, 100th, 1000th holograms (a), (b) and (c), respectively, after 1000 holograms are stored by an exposure time in NaCl solution where the crystal is

3 理论分析

在曝光过程中, 光伏效应使 Fe:LiNbO₃ 晶体产生光伏电流, 并且随着表面电荷的不断积累, 光伏电场将不断加强, 如图 6 所示。

存储了几幅全息图后, 晶体表面对小纸屑有吸引作用, 说明在晶体表面存在静电荷, 即出现光伏效应。将晶体中的总电场表示为 $E(x, t)$, 它包括了光伏直流电场 $E_0(t)$ 和晶体内部的空间电荷场 $E_{sc}(x, t)$

$$E(x, t) = E_0(t) + E_{sc}(x, t) \quad (1)$$

并且光伏直流电场可以表示为^[4]

$$E_0(t) = E_{0ph}[1 - \exp(-t/\tau_{di})] \quad (2)$$

其中 E_{0ph} 为晶体被照射 $t = \infty$ 时的光伏电场强度。当第 k 幅全息图被记录时, 晶体的折射率为 $n(t_k)$

$$n(t_k) = n_0(t_k) + \sum_{j=1}^k n_1(t_k - t_{k-1}) \quad (3)$$

其中 $n_0(t)$ 和 $n_1(t)$ 表示 $n(t)$ 的傅里叶变换的零阶和一阶分量, 它们分别由 $E(x, t)$ 的零阶和一阶分量决定。对于大容量体全息存储而言, 折射率变化是一

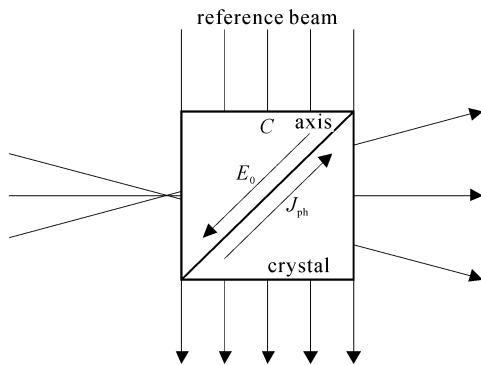


图 6 全息图像被曝光记录时, 晶体表面的光伏直流电场的强度

Fig. 6 When one of the holograms is illuminated, the photovoltaic DC field on the crystal surface

个非常小量 ($\sim 10^{-4}/N$, N 为多重曝光的全息图数目)。在第 k 幅全息图曝光时, $n_0(t_k)$ 可以看作常数

$$n_{0k} \cong n_0(t_k) = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{eff} E_0(t_k) + n_0 \quad (4)$$

式中, n_0 为晶体未被光照射时的折射率, γ_{eff} 为电光系数。由于参考光和信号光都是寻常光, $n_{00} = n(0) = n_0(0) = n_0$ 。用 $\mathbf{K}, \mathbf{K}_{Rk}$ 和 \mathbf{K}_{Sk} 分别表示全息光栅矢量、参考光矢量和信号光矢量, Bragg 条件: $\mathbf{K}_{Rk} + \mathbf{K} = \mathbf{K}_{Sk}$ 。信号光与参考光的光波矢量模为 $\mathbf{K}_{Rk} = \mathbf{K}_{Sk} = 2\pi n_{0k}/\lambda_0$ (其中 λ_0 为光在真空中的波长)。再存储了 m 幅全息图后, 折射率变为 $n_{0(k+m)}$ 。因此当晶体曝光时, 以前全息光栅的 Bragg 条件将被破坏。如图 7 所示, 为了符合 Bragg 条件的读出全息光栅 \mathbf{K} , 读出光必须相对于原来记录时的参考光偏转一个很小的角度 $\delta\theta_k$

$$\delta\theta_k = [n_{0(k+m)} - n_{0k}]/n_0 \tan\alpha_0 \quad (5)$$

其中信号光与参考光的夹角为 $2\alpha_0$ 。据式(5), Bragg 失配角 $\delta\theta_k$ 不仅与光伏直流电场有关, 也与参考光和信号光的夹角有关。在谱面全息存储过程中, 不同位置的像素对应不同入射角度的平面波, 因此也对应不同的与参考光的夹角 $2\alpha_0$, 对于光伏效应的敏感程度也是不同的。

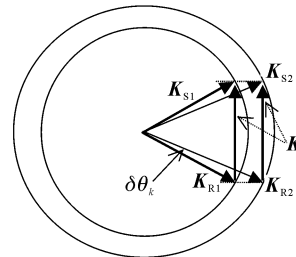


图 7 在光伏效应介质中, 大容量体全息的 Bragg 条件波矢量示意图

Fig. 7 Wave vector diagram illustrating the Bragg condition of volume holograms in photovoltaic media

考虑 90° 的全息存储系统, $\alpha_0 \cong 45^\circ$, 根据公式 (5) 可以得到

$$\vartheta_{\max} = \frac{1}{2} n_o^2 \gamma_{\text{eff}} E_{\text{oph}} \quad (6)$$

根据衍射理论, 一个厚度为 d 的全息光栅, 能产生 Bragg 衍射的最大的角度间隔为^[7]

$$\vartheta_B = \frac{\lambda_0}{n_o d \sin 2\alpha_0} \quad (7)$$

由于光伏直流电场的方向平行于 C 轴^[5], 近似的 $\gamma_{\text{eff}} = \gamma_{13}$ 。取 $n_o = 2.344$, $\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-10}$ cm/V^[8], $E_{\text{oph}} = 10$ kV/cm^[5], $d = 1$ cm, $\lambda_0 = 514.5$ nm, 可以得到 $\vartheta_{\max} = 2.4 \times 10^{-5}$ rad 和 $\vartheta_B = 2.2 \times 10^{-5}$ rad, 即 ϑ 与 ϑ_B 大小相当。这意味着大容量体全息存储时, 光伏直流电场将对全息图的再现像产生显著的影响, 尤其是最先存储的全息图。

文献[4]中, Clair Gu 等已总结了在开路情况下 (E_0 为时间函数时), 稳态光栅的衍射效率 η_0 将远小于短路状态 ($E_0 = 0$)。如果考虑等光栅强度记录, 无擦除和小折射率调制度的情况, 大容量全息光栅的衍射效率将衰减为 η_0/N^2 ^[7,9]。这意味着光伏直流电场的存在, 使得全息图的再现像的衍射效率下降很多。

4 结 论

由光伏效应所生成的光伏电场不利于大容量全息存储, 它相当于一个不断增强的外加电场作用于晶体上, 不仅破坏了已经被存储的全息光栅的

Bragg 选择性, 也降低了全息光栅的强度。为了消除光伏电场, 使用电解质溶液短路晶体。实验与理论证明这种方法能有效地提高全息图的读出质量和衍射效率。

参 考 文 献

- 1 F. H. Mok. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18** (11):915~917
- 2 J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesslink. Volume holographic storage and retrieval of digital data [J]. *Science*, 1994, **265**(5173):749~752
- 3 A. M. Glass. The photorefractive effect [J]. *Opt. Eng.*, 1978, **17**(5):470~479
- 4 C. Gu, J. Hong, H.-Y. Li *et al.*. Dynamics of grating formation in photovoltaic media [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(3):1167~1172
- 5 P. Yeh. Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics [M]. New York: J. Wiley & Sons, 1993. 111~114
- 6 A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic *et al.*. Optically-induced refractive index, in homogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **9** (1):72~74
- 7 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9):2909~2947
- 8 M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Khomenko. Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991. 223~226
- 9 D. Brady, K. Hsu, D. Psaltis. Periodically refreshed multiply exposed photorefractive holograms [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(14):817~819

本刊增页及更改出版日期启事

近年来, 由于来稿量较多, 而本刊的容量又有限, 为了缩短论文的发表周期, 故从 2004 年第 1 期起, 经上级有关部门批准, 本刊将从原来的 96 面增至 112 面, 出版日期从每月 20 日提前为每月 10 日。特此通知。

《中国激光》编辑部

2003 年 8 月