

文章编号: 0258-7025(2005)02-0236-04

光折变多重全息图分批热固定的光擦除特性

江竹青, 陶世荃, 袁 桦, 刘国庆, 丁晓红

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

摘要 研究光折变多重全息图分批热固定方法, 依据热固定的基本理论模型研究离子补偿后的全息电子光栅在分批记录和定影过程中的光擦除特点。引入批间光擦除时间常数对多重全息图分批热固定的批间擦除特性进行定量描述, 给出了测量批间光擦除时间常数的实验方法, 并测得实际晶体的批间光擦除时间常数。研究表明, 被记录光激发的已定影全息图的获陷电子对其离子光栅的屏蔽作用, 使得多重全息光栅的各批间光擦除时间常数 τ_F 远大于每批内光栅间的擦除时间常数 τ_E , 实验结果与理论预期一致。证实了批间光擦除时间常数与批内光擦除时间常数的差异是采用分批存储热固定技术高效存储热固定高密度全息图的基本依据。

关键词 全息; 分批热固定; 批间光擦除; 非易失性存储; 光折变晶体

中图分类号 TP 333.4⁺2 **文献标识码** A

Optical Erasure Characteristic of Batch Thermal Fixing for Photorefractive Multiplexing Holograms

JIANG Zhu-qing, TAO Shi-quan, YUAN Wei, LIU Guo-qing, DING Xiao-hong

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract The batch thermal fixing scheme for multiplexed holograms is investigated. The dynamic behaviors of both electrons and ions in the case of light illumination and elevated temperature are theoretically analyzed, and hereby the optical erasure effect of subsequent recording light on ion-compensated electronic gratings is presented. The inter-batch optical erasure time constant, τ_F , is theoretically introduced, to evaluate the optical erasure to electronic gratings compensated by ions. The special experiment for measuring the parameter τ_F is designed and performed. The experimental result shows that inter-batch optical erasure time constant, τ_F , is much longer than intra-batch optical erasure time constant, τ_E , which agrees well with the theoretical prediction. Owing to the difference between τ_F and τ_E , the batch thermal fixing is an effective technique to achieve nonvolatile high-capability holographic storage.

Key words hologram; batch thermal fixing; inter-batch optical erasure; nonvolatile storage; photorefractive crystal

光折变晶体中的体全息存储技术是利用晶体的光折变效应, 通过采用角度复用、空角复用、波长复用、相位复用等记录方法, 将光信息以全息电子光栅的形式存储于光折变晶体中, 并且使用均匀光照射读取信息。由于电子光栅的暗保存时间较短(通常为数小时至数天), 存储于光折变晶体中的信息难以长期保存; 尤其是, 由于光折变晶体中的获陷电子对

光照敏感, 已记录的电子光栅全息图在信息读取过程中会受到读出光的擦除作用(光擦除时间常数通常为数百秒至数千秒), 引起全息图衍射效率降低, 导致存储信息的丢失。因此, 需要采用非易失性存储技术降低或消除光折变材料中信息载体对读出光的敏感性。

热固定技术是解决光折变晶体中信息非易失性

收稿日期: 2003-09-09; 收到修改稿日期: 2004-02-04

基金项目: 国家 973 计划(G19990330)和高校骨干教师资助计划(63006311200005)资助项目。

作者简介: 江竹青(1963—), 女, 湖南平江人, 北京工业大学应用数理学院副教授, 主要从事光学信息处理、光学全息存储等方面的研究。E-mail: zhqjiang@bjpu.edu.cn

存储的一种有效方法,它是通过替换信息载体对全息图实现固定的,即对已存有信息的光折变晶体加热,使晶体中对光不敏感的离子迁移,形成完全复制电子光栅结构的离子光栅,完成了向离子光栅转存信息。当清除掉光折变晶体中的电子光栅后,对光照不敏感的离子光栅是光折变晶体中唯一的信息载体,允许对其进行反复的无损读出。并且,由于离子光栅在室温下比电子光栅更稳定,使得热固定后的全息图更利于长期保存。采用室温记录的后补偿法、高温同时记录补偿法以及增量热固定方法均可以对多重全息图进行热固定^[1~3]。

本文依据热固定的基本理论模型,研究光折变多重全息图的分批热固定方法。

1 理论分析

采用分批热固定方法对大量全息图进行角度复用存储并固定时,将待复用存储固定的 M 个全息图均分成 S 批(每批有 $N = M/S$ 个全息图),首先在室温($\sim 25^\circ\text{C}$)下依次复用记录第一批的 N 个全息图,然后加热晶体对记入的全息图同时进行高温($\sim 140^\circ\text{C}$)定影;再依次分别对第二批、第三批、直至第 S 批全息图进行同样的室温记录和高温定影;当所有批次全息图的记录和定影完成后,用光照射晶体进行显影^[4]。

在分批存储热固定过程中,每批次内的 N 个全息图均是在室温下记录,在高温下经历离子补偿的热定影过程。根据角度复用记录多重全息图的动态写入和擦除特点,在顺序写入各个全息图过程中,记录光会对本批内先已写入的未定影全息图进行常规光擦除;并在各批次全息图顺序写入过程中,记录光同时也对其他已定影批次的全息图有光擦除作用。

1.1 批间擦除作用机制

由于获陷电子和离子在光照和高温下输运快慢有差异并具有相互屏蔽的动态特点,除了最后一批次全息图外,所有批次全息图均会受到其他批次全息图记录和固定过程的影响。

在多重全息图的分批热固定过程中,当后续全息图记录光照射晶体时,对于已定影的全息电子光栅会产生光擦除作用。依据 Yariv 等的热固定理论^[2],在光照过程中,离子补偿后的获陷电子数密度调制量 $N_{d1}^+(t)$ (描述了全息电子光栅强度)为

$$N_{d1}^+(t) = \left(\frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) N_{d1}^+(t_c) +$$

$$\left[1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \right] N_{d1}^+(t_c) \exp(-\omega_1 t), \quad (1)$$

其中 ω_e 为电子介电弛豫频率, ω_i 为离子介电弛豫频率, D_i 为离子扩散系数, K 为全息光栅的空间频率, $N_{d1}^+(t_c)$ 为全息图定影结束时获陷电子分布的调制量, ω_1 为开路情况下的特征弛豫率,它可表示为

$$\omega_1 \equiv \omega_e \left[1 + K^2 d^2 + i \frac{E_{p.v.}}{E_q} \left(\frac{N_d - N_a}{N_d} \right) \right], \quad (2)$$

式中 d 为电子在电离施主的势场内周期运动的长度,称为电子德拜屏蔽长度, N_d 为总的施主数密度, N_a 为受主数密度。极限空间电荷场为 $E_q \equiv eN_a(1 - N_a/N_d)/(\epsilon K)$, 光生伏打电场为 $E_{p.v.} \equiv pI_w(N_d - N_a)/(e\mu_e n_{e0})$ 。此处, 光电场的强弱直接取决于写入后续全息图时照射晶体的平均光强 I_w 。

考虑(1)式中的指数因子 $\omega_1 t \ll 1$ 的情况下,可以对指数 $\exp(-\omega_1 t)$ 展开,并近似取前两项为 $\exp(-\omega_1 t) \approx 1 - \omega_1 t$ 。将此近似式代入(1)式,则得到 $\omega_1 t \ll 1$ 时的获陷电子数密度调制量随时间变化的近似表示式为

$$N_{d1}^+(t) \approx \left[1 - \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t \right] N_{d1}^+(t_c), \quad (3)$$

另外,由于 $\left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) < 1$, 则

$$\left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t < 1, \text{ 并且有}$$

$$\exp \left[- \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t \right] \approx$$

$$\left[1 - \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t \right], \quad (4)$$

因此, $\omega_1 t \ll 1$ 时,已定影全息电子光栅的获陷电子数密度调制量(描述了电子光栅强度)随时间变化的近似表示为

$$N_{d1}^+(t) \approx N_{d1}^+(t_c) \exp \left[- \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t \right], \quad (5)$$

已定影全息电子光栅的空间电荷场分布为

$$E_{d1} = \frac{ie}{\epsilon K} \times$$

$$\left\{ N_{d1}^+(t_c) \exp \left[- \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 t \right] \right\}, \quad (6)$$

空间电荷场随时间 t 指数衰减,表明后续全息记录光对已定影的全息电子光栅具有光擦除作用。

在这种光擦除过程中,由于定影后的全息图具有初始记录全息电子光栅和定影补偿的离子光栅同

时存在的特点,写入光激发的获陷电子在进行常规运输(即扩散以及产生光生伏打电流)的同时,还在离子空间电荷场作用下进行漂移,并去补偿全息离子图样。或者说,对已定影的全息电子光栅强度的光擦除作用,是常规运输机制和电子补偿共同作用的结果。由于这种光擦除发生在不同批次全息图的写入过程中,称之为批间光擦除作用。

定义批间光擦除时间常数 τ_F 为

$$\tau_F = \left[\left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) \omega_1 \right]^{-1}. \quad (7)$$

$\tau_E = \omega_1^{-1}$, τ_E 为多重全息图记录过程中记录光对未定影全息图的常规光擦除时间常数。由于这种常规光擦除作用出现在同批全息图的写入过程中,故称之为批内光擦除作用,它是形成全息电子光栅的获陷电子被光电离后进行常规运输的结果。

由于(7)式中 $\left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_i + D_i K^2} \times \frac{\omega_e}{\omega_1} \right) < 1$,

因此,与批内光擦除比较,已定影的全息电子光栅空间电荷场在光照下的衰减速率显然变慢了。由于获陷电子被写入光激发后在离子电荷场的影响下漂移和扩散,并去屏蔽离子图样,电子的这种屏蔽作用减缓了记录光对已定影全息电子光栅的光擦除作用,使得批间光擦除时间常数 τ_F 远大于批内光擦除时间常数 τ_E 。批间光擦除作用的快慢程度依赖于离子补偿的强弱程度,光栅空间频率 K , 电子受主数密度 N_a 和光生伏打效应强度等多种晶体参数和记录条件。可以通过改变光路记录几何、以及选择适当掺杂和后处理的晶体来优化这些参数和条件,增大批间光擦除时间常数,尽可能减缓对已定影全息图的批间光擦除作用,以提高多重全息图固定后的衍射效率。

1.2 批间光擦除时间特性

光折变晶体中记录的全息图是折射率相位光栅,通常采用光栅折射率调制度参量随时间的变化描述全息光栅的时间特性。因此,为了描述分批热固定多重全息图的批间光擦除时间特性,根据线性电光效应,并利用(6)式,得出批间光擦除过程中全息电子光栅折射率调制度的表示式为

$$\Delta n_{e,B}(t) = \Delta n_{e,B}(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_F}\right), \quad (8)$$

式中 $\Delta n_B(0)$ 为全息电子光栅在批间擦除过程中的初始折射率调制度。

对于 M 幅均分成 S 批进行分批存储固定的全息图,可以采用(8)式描述其批间光擦除特性。

假定每一批次全息图在完成各自批内所有全息

图记录时,批内所有全息图达到相同的衍射效率,或者说达到相同的光栅强度,并且此值作为各批全息图的批间光擦除的初始值。考虑所有批次全息图的记录和热定影过程完成时,第 m 批的所有全息图均受到其后 $[(S-m) \times N]$ 幅全息图的批间光擦除作用。第 m 批全息图的批间光擦除电子光栅强度的初始值可以统一表示为 $\Delta n_{e,B}^m(0)$ 。根据(8)式,第 m 批全息图受到后续 $[(S-m) \times N]$ 幅全息图的批间光擦除后,其电子光栅强度 $\Delta n_{e,B}^m$ 为

$$\Delta n_{e,B}^m = \Delta n_{e,B}^m(0) \exp\left[-\frac{\sum_{i=1}^{S-m} t_{m+i}}{\tau_F}\right], \quad (9)$$

t_{m+i} 为第 $m+i$ 批次内的所有全息图的总写入时间。

2 实验测量批间光擦除时间常数

2.1 实验方法

(7)式表明批间光擦除时间常数是晶体参数和记录条件的函数,这些参数在不同条件下的取值不同,并且通常难以在同一条件下获得所有参数值。实际上,除了光栅空间频率 K 易于计算得到外,其他参数不容易确定,因此需要通过实验方法确定 τ_F 在具体情况下的取值。

采用少量全息图模拟分批热固定过程,来测定晶体分批定影的批间擦除时间常数。具体方法是,在铌酸锂晶体中,分 5 批次记录固定 5 个全息图。

首先第一批记录一个全息图。记录过程中用功率计采集监测衍射功率值,当全息图衍射功率达到约小于饱和衍射功率的 1/10 时,结束记录过程并读取此时的全息图峰值衍射功率 η_1 。然后,加热晶体对第一个全息光栅实施定影过程。完成定影后,让晶体自然冷却到室温,再用参考光扫描读出该全息图的峰值衍射功率,以确认离子对电子光栅的补偿程度。此时读出的全息图衍射功率接近本底值,可以认为实现了完全补偿。

第二批记录一个全息图。当此全息图衍射功率达到第一批全息图的记录衍射功率时,结束记录过程,记下第二批全息图的曝光时间 t_2 ,并分别扫描读取这两个全息图的峰值衍射功率值。读到的第二个全息图峰值衍射功率是其记录后的直接读值 η_2 ; 而读到的第一个全息图的峰值衍射功率,是在第二个全息图写入光的显影作用下(光照显影时间与曝光时间相等),光擦除掉第一个全息图的部分电子光栅,而显影出第一个全息图的部分离子光栅的峰值衍射功率,因此其衍射功率 $\Delta \eta_1^0$ 也代表第一个全息

图的电子光栅的衰减值,其下标表示全息图序号,上标表示经历一次批间擦除。记录了第二批全息图后,加热晶体进行第二次热定影,待完成热定影后,让晶体自然冷却到室温。

依次对后续全息图重复第二个全息图的记录和定影过程,并且在采集刚记录的一批全息图衍射功率时也要采集先前批次记录的全息图衍射功率。完成 5 批次记录和热定影后,得到 5 个全息图的原始记录衍射功率 η_i , 批间擦除引起的衰减值 $\Delta\eta_i^m$ ($i, m = 1, 2, 3, 4, 5$), 以及各次记录的曝光时间 t_i 。然后按照(9)式对实验数据进行拟合,可以得到批间光擦

除时间常数。

2.2 实验结果

实验中所用的记录介质为掺铁 0.03% 的铌酸锂晶体(其序号为 HNS4, 尺寸 10 mm×10 mm×10 mm, z -45°切割), 记录光波长 532 nm, 记录光的总光强为 226 mW/cm²。采用邻面入射式全息记录光路, 以纯角度复用记录多重全息图。热定影温度为 140℃, 并在此温度下持续 10~15 min 进行定影; 采用光强为 400~600 mW/cm² 的非相干光进行显影。在批间擦除过程中, 测得的全息光栅峰值衍射功率值列于表 1 中。

表 1 5 批次记录固定的全息光栅的峰值衍射功率(μ W)

Table 1 Peak diffraction powers of holographic gratings recorded in 5 batches

Batch number	Hologram 1	Hologram 2	Hologram 3	Hologram 4	Hologram 5
The first batch	$\eta_1 = 104.0$				
The second batch	$\Delta\eta_1^1 = 3.3$	$\eta_2 = 101.0$			
The third batch	$\Delta\eta_1^2 = 2.1$	$\Delta\eta_2^1 = 2.5$	$\eta_3 = 110.0$		
The fourth batch	$\Delta\eta_1^3 = 2.6$	$\Delta\eta_2^2 = 2.5$	$\Delta\eta_3^1 = 2.8$	$\eta_4 = 102.0$	
The fifth batch	$\Delta\eta_1^4 = 1.9$	$\Delta\eta_2^3 = 2.3$	$\Delta\eta_3^2 = 2.6$	$\Delta\eta_4^1 = 3.2$	$\eta_5 = 95.1$

由表 1 数据, 全息电子光栅原始记录衍射功率为 η_1 , 经过一次批间擦除的衍射功率为 $\eta_1 - \Delta\eta_1^1$, 经过两次批间擦除后为 $\eta_1 - \Delta\eta_1^1 - \Delta\eta_1^2$, 经过三次批间擦除后为 $\eta_1 - \Delta\eta_1^1 - \Delta\eta_1^2 - \Delta\eta_1^3$, 经过四次批间擦除后为 $\eta_1 - \Delta\eta_1^1 - \Delta\eta_1^2 - \Delta\eta_1^3 - \Delta\eta_1^4$ 。将各批次的衍射功率对擦除时间进行对数拟合, 得到实验数据的拟合曲线如图 1 所示, 拟合出的批间擦除时间常数为 4200 s。

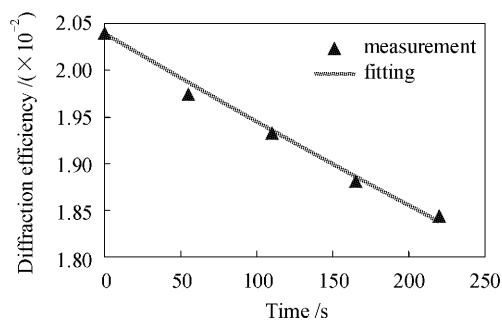


图 1 HNS4 晶体的批间光擦除时间常数拟合曲线

Fig. 1 A fitting curve of inter-batch optical erasure time constant for the crystal HNS4

由于同样条件下测得晶体 HNS4 的批内擦除时间常数为 900 s, 因此实验结果证实: 在光折变晶体中进行分批存储热固定时, 不同批次光栅之间的

批间光擦除时间常数 τ_F 远大于各批内光栅之间的批内光擦除时间常数 τ_E 。

3 结 论

研究表明, 分批热固定多重全息图过程中, 后续记录光对批内的未定影全息图进行批内光擦除, 而对其他批次已定影的全息图进行批间光擦除, 被记录光激发的已定影全息图的获陷电子对其离子光栅的屏蔽作用, 使得批间光擦除作用比批内光擦除缓慢得多。通过增大批间光擦除时间常数与批内光擦除时间常数的差异, 可以有效提高多重全息图固定后的衍射效率, 从而能够对高密度全息图实现高效存储热固定。

参 考 文 献

- 1 D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips *et al.*. Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(4):182~184
- 2 A. Yariv, Sergei S. Orlov, George A. Rakuljic. Holographic storage dynamics in lithium niobate: theory and experiment [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(11):2513~2523
- 3 X. An, D. Psaltis, G. Burr. Thermal fixing of 10000 holograms in LiNbO₃:Fe [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(2):386~392
- 4 Zhuqing Jiang, Gang Meng, Guoqing Liu *et al.*. A study on batch method of thermal fixing for multiplexed holographic recordings [C]. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2001, **674**:3.3: 1~3.3:6