

全息存储中的栅增强读出*

忽满利 李育林 陈慰宗 刘继芳 张培琨 贾宏志
(中国科学院西安光机所 西安 710068)

刘玉华
(佛山大学物理系 佛山 528000)

提要 基于波的耦合理论,给出了实际写入光折变晶体中光栅振幅的空间分布函数,通过数值解耦分析了单光束读栅和双面交替读栅时全息光栅的增强特性。提出了一种易于实现双面交替读栅增强衍射效率的存储结构,此结构中包括一个存储晶体和一个动态全息刷新器,给出了实现栅增强的最佳结构参数。

关键词 全息存储,光栅增强,交替读栅

光折变全息存储具有存储容量大、存取时间短、可擦重写、实时性强等特点,具有诱人的应用前景。光折变全息存储容量大的特点主要是通过多重编码技术来实现的,例如角度编码、波长编码、空间-角度编码等^[1,2],利用这种技术能够将一系列全息图以折射率栅的形式顺序地记录在晶体的同一体积内。但是由于存在光擦除作用,先前存入的光栅由于后续全息图写入时的曝光而指数衰减式地被擦除,结果是记录的一系列全息光栅之间存在曝光不均匀性。为此人们提出增量曝光法,解决了通常曝光不均匀的问题^[2]。但随着晶体同一位置存储的全息图数量的增加,再现某一全息图的衍射效率随之减小,原因是再现一全息图的衍射效率与该位置记录的全息图总数的平方成反比关系^[3]。为了提高再现的衍射效率,P. Yeh 等提出了一种双面交替读栅来实现自增强衍射的方法,并给出了实验结果^[4,5]。由于这种方法要用一相位共轭镜对读出的信号光进行波前共轭,而通常的相位共轭镜存在响应时间长和反射率低的缺点,不易实现快速增强衍射读出。为此清华大学李晓春等提出了一种双晶体存储的方案^[6],这种方法是:记录时信号光先后经过两块晶体,在晶体中同时写入完全相同的信号光栅。增强光栅时,交替使用记录时前晶体的参考光和后晶体参考光的反方向传播光(相位共轭光)。这种方案很好地解决了单块晶体中相位共轭光响应慢的缺点,但是一方面因为使用了两块晶体,存储结构变得相对复杂;另一方面由于衍射效率低,无论两读出光强比和每次读出持续时间如何选取,都不能兼顾两块晶体中感应光栅同时对称分布在晶体当中,也就是说交替读出时,一块晶体的光栅振幅在增强而另一块则在减弱,几次交替读出后,光栅减小的那块晶体的衍射效率趋于零,另一块没有显著的增强效果,因此实现起来同样有困难。

本文基于波的耦合理论,首先给出了实际写入晶体中光栅振幅的空间分布函数,然后分析单光束读出时此空间分布光栅的瞬态特性以及双面交替读出时的增强特性。基于动态全息刷新器(DHR)的新型器件提出一种单块晶体双面交替读出的自增强衍射存储结构。讨论了双面

* 国家自然科学基金资助项目(编号:69687005)。

收稿日期:1998-08-10;收到修改稿日期:1998-10-18

读栅时间比和读栅光强比对栅增强特性的影响。

1 光折变晶体中稳态光栅的写入

通常全息光栅的写入是受两波耦合、光散射和吸收等影响的动态过程^[7]。如果不考虑光耦合以外的影响, 光波-介质相互作用可用以下时空非线性耦合方程来描述^[4]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = -(\Gamma/2)gA_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = (\Gamma^*/2)gA_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} \left[g - \frac{A_1 A_2^*}{I_0} \right] \quad (3)$$

式中 Γ 为光折变耦合常数, $g(t, z)$ 为光栅相对振幅, τ 为晶体光折变响应时间, $I_0 = A_1^2 + A_2^2$ 。方程(1)和(2)描述两波之间耦合, 方程(3)描述光栅的增长和衰减。设晶体中载流子输运以扩散机制为主, 则 Γ 为实数, 取边界及初始条件为

$$A_1(t, z=0) = A_{10} \quad A_2(t, z=0) = A_{20} \quad (4)$$

$$g(t=0, z) = 0 \quad (5)$$

稳态时有 $\partial g / \partial t = 0$, 应用此条件及方程(1), (2)解得

$$g(z) = g_{\max} \operatorname{sech}[(\Gamma z - \ln r_0)/2] \quad (6)$$

式中 $r_0 = A_{10}^2 / A_{20}^2$ 为参考光和信号光强之比, 或称写栅光强比, 决定着栅振幅 $g(z)$ 在晶体中的分布, 并对读出时的栅增强和衍射效率有一定的影响。 g_{\max} 为光栅振幅最大值。由(6)可见, 通常写入的光栅振幅实际为双曲正割函数分布, 而不是均匀分布。

2 光折变晶体中读栅时的瞬态栅增强特性

2.1 单光束读栅时的栅增强特性

设晶体中已写入一栅振幅按双曲正割分布的光栅, 当读出光 B_1 以布拉格角读栅时, 如图1所示, 衍射光 B_2 与读出光耦合产生的感应光栅和原记录光栅叠加形成新的光栅 $G(t, z)$, 两光波 B_1 和 B_2 及光栅 $G(t, z)$ 满足方程(1)~(3)。注意此时边界条件及初始条件为

$$B_1(t, z=0) = B_{10}, \quad B_2(t, z=0) = 0 \quad (7)$$

$$G(t=0, z) = g(z) \quad (8)$$

$$\text{引入光栅强度参量 } u = \int_0^z G(z') dz' \quad (9)$$

对读栅过程中光栅强度参量的研究分析结果表明^[4], 只有当光折变耦合强度足够强时, 对于较弱的初始光栅振幅, 读出过程才有短时间的栅增强。随着读栅时间的延长, 光栅最终要被擦除。图2示出了 $g_{\max} = 0.1, \Gamma L = 10, r_0 = 10$ 时栅振幅的空间分布随时间的演化过程, 随着读栅时间从 $t = 0$ 到 $t = 10\tau$, 晶体的入射端面附近光栅被逐渐擦除, 而出射端面附近逐渐增强, 读栅时间再延长, 出射端面附近栅逐渐衰减, 整个栅逐渐被擦除掉。

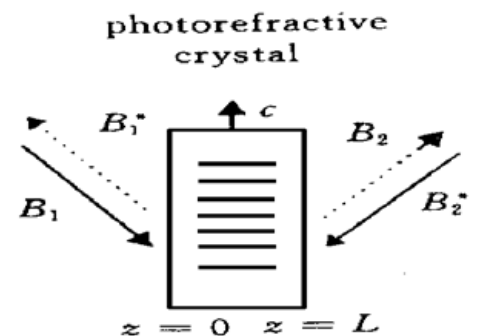


图1 单面读栅或双面交替读栅时的结构图
Fig. 1 Schematic diagram of a single-beam or double-side alternative readout of a photorefractive grating

图 3 给出了 $g_{\max} = 0.1, \Gamma L = 10$ 时, 对于不同的写入光强比, $u(t, z)$ 随读栅时间 t 的变化。当写入光强比 $r_0 = 10$ 时, 瞬态光栅增强达到相对较大值。以上分析可见, 光栅的增强对光折变耦合强度和读栅时间有一定限制, 读光栅时, 栅振幅随读出时间重新分布, 栅振幅峰值被不断推向右方直至推出晶体。因此为了进一步增强栅振幅, 必须从晶体的后端面读栅, 即采取双面交替读栅方案。

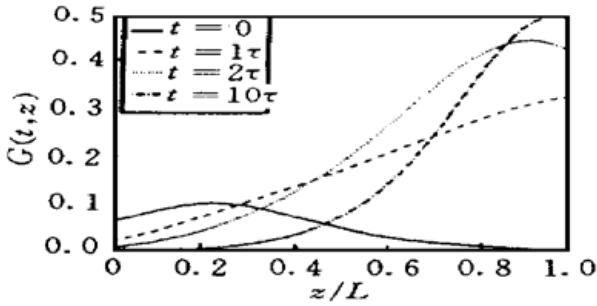


图 2 光栅振幅的空间分布

Fig. 2 Spatial variation of the grating amplitude ($t = 0, \tau, 2\tau, 10\tau, \Gamma L = 10, g_{\max} = 0.1, r_0 = 10$)

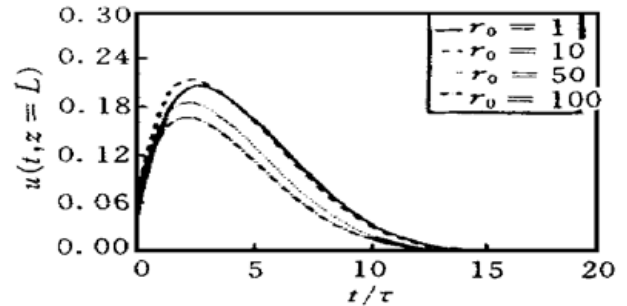


图 3 光栅强度随时间的变化

Fig. 3 Temporal variation of the grating strength ($r_0 = 1, 10, 50, 100, \Gamma L = 10, g_{\max} = 0.1$)

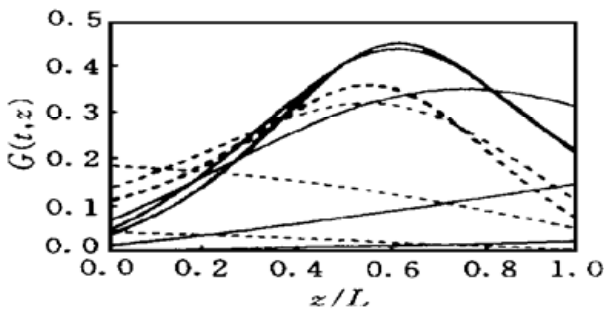


图 4 双面交替读出循环 6 次栅振幅空间分布的变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation of the amplitude $G(t, z)$ after 6 cycles of double-side alternating readout ($t_1 = t_2 = 0.5\tau, g_{\max} = 0.01, \Gamma L = 10$ and $r_0 = 10$)

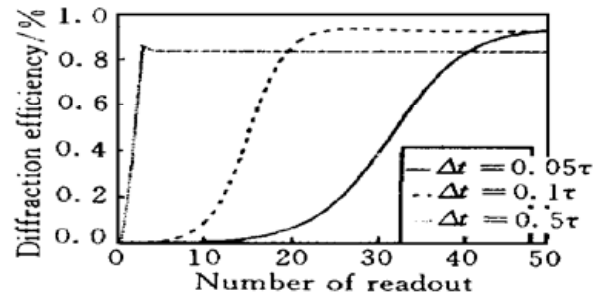


图 5 衍射效率随双面交替读出循环次数的变化

Fig. 5 Diffraction efficiency as a function of cycle number of double-side alternative readout ($g_{\max} = 0.01, \Gamma L = 10, r_0 = 10, \Delta t = 0.05, 0.1, 0.5$)

2.2 双面交替读栅时的栅增强特性

双面交替读出光栅方法如图 1 所示, 先由脉冲光 B_1 从 $z = 0$ 端读 t_1 时间(脉冲光可由调制连续激光而获得), 再由脉冲光 B_2 的共轭光 B_2^* 从 $z = L$ 端读 t_2 时间, 两读出脉冲的持续时间(或光脉冲宽度)的选取应使每次读出能保持光栅得到增强。图 4 表示两读出脉冲的光强相等, 两光脉冲宽度 $t_1 = t_2 = \Delta t = 0.5\tau$ 时, 六次循环读出光栅的空间分布。由图可见, 几次循环后, 光栅振幅逐渐趋于稳定, 得到显著增强了的栅振幅大都集中到晶体中心。图 5 是不同读栅持续时间(其他参数同图 4), 衍射效率随读出循环次数的关系, 读栅光脉冲宽度宽, 衍射效率达到稳定值所需的循环次数就减少, 但无论读栅持续时间如何选取, 衍射效率达到稳定值所需的总曝光时间是一定的(约为 20τ)。要使稳定的衍射效率达到较大值, 读栅持续时间不宜过长, 这里取 0.1τ 为宜。实际上由于读出光强的大小会影响光折变的响应时间^[8](同光强成反比关系), 因此即使使用等光脉冲宽度读栅, 两脉冲光强不等也将产生不对称性读出, 这种不对称读出可通过调整读栅光脉冲宽度 t_1 和 t_2 来补偿, 以便使增强后稳定的栅振幅分布的峰值处在晶体的中央, 否则晶体中的光栅不会产生快速的增强。对于单块晶体存储, 当读出两脉冲的光强不对称时容易通过调整读栅脉冲持续时间来补偿。但对双块晶体存储, 不能通过调整读出脉冲

持续时间同时补偿读两块晶体时因读出光强不对称引起增强光栅的不对称性。借助一种新型的光电器件-动态全息刷新器对单块晶体双面交替读出易于克服以上缺点, 实现光栅的增强读出。

3 易实现栅增强的单块晶体存储结构

用动态全息刷新器实现栅增强的存储结构如图 6 所示, DHR, PBS 和 PRC 分别是动态全息刷新器、分光棱镜和光折变晶体。动态全息刷新器是一种用 Mosis 技术制造的表层为液晶空间调制器, 底部为半导体光电探测器和寄存器的光电集成电路。这种器件上的每一像素同时具有光调制、光探测和数据寄存的功能。光束调制器 T_1 和 T_2 (或用斩波器) 用于获得脉冲光。全息存储时先关闭光闸 S_2 , T_1 和 T_2 (此时不起调制作用但 R 光可通过), 然后将要存储的图像经计算机写到 DHR 上, 这时 DHR 被用作空间光调制器(SLM)。由读像平面光波 R 从 DHR 上读得的信号光波 1, 经 PBS 进入晶体中, 和参考光 2 相干, 在光折变效应下, 图像以折射率栅的形式存储在晶体中。栅增强读出时, 先关掉光闸 S_1 , 后打开 T_1, T_2 和 S_2 , 用与平面参考光波 2 传播相反的脉冲光波 2^* (2 的相位共轭光) 再现全息图, 其衍射光 1^* (信号光的相位共轭光) 经 PBS 到 DHR 上, 这时 DHR 被用作光探测器, 探测到的图像数据随即进入 DHR 中的寄存器, 每一像素上的寄存单元驱动相应的调制单元(这种探测-寄存-调制的过程不经过计算机, 仅在 DHR 器件内完成, 但可由计算机控制其转换速度), 这时在 DHR 上显示的是全息记录时

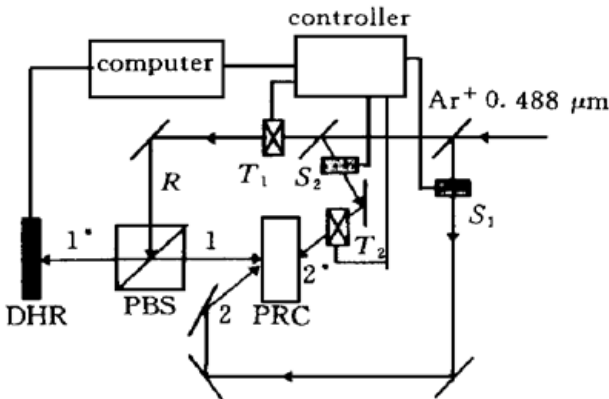


图 6 用 DHR 实现光栅增强的结构图

Fig. 6 Schematic diagram of the enhancement of a weak photorefractive grating using DHS

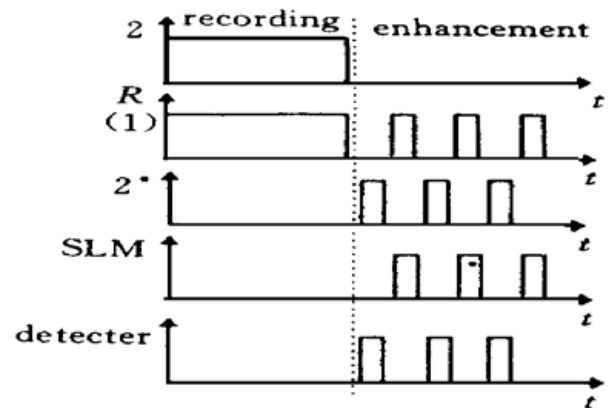


图 7 记录和栅增强读出时的曝光顺序

Fig. 7 The exposure sequence for recording and enhanced grating readout

写入到其上的原图像。交替使用 R 和 2^* , 就能达到双面交替读栅的目的。图 7 是记录和栅增强读出时的曝光时序图。由于这种存储结构不需要相位共轭镜, 因此可实现光栅的快速增强。因为 DHR 上的图像不因长时间读像而衰减或被擦除, 所以容易通过调整读像光强和读像时间来调整 1 的光强和读栅时间, 使双面交替读栅具有对称性。引入两端面读栅光强比 $e = I_1/I_2$ 和读栅光脉冲宽度比 $f = t_1/t_2$ 。图 8(a) 给出了 $f = 1, e$ 取不同值时, 衍射效率随读出时间的变化。 e 偏离 1 越远, 衍射效率随时间的增长越慢, 特别是 $e = 0.1$ 时, 衍射效率几乎为零。这主要是 不对称光强读出, 使光栅分布峰值偏离晶体中央, 光栅强度增长变慢的原因。当 $e = 9$, 循环读出持续时间比取 $f = 1/9$ 时, 衍射效率随读出时间的变化如图 8(b) 所示。由图可见, 通过调整读栅持续时间比很好地补偿了光强的不对称引起的不对称栅增强读出, 使衍射效率快速增长。

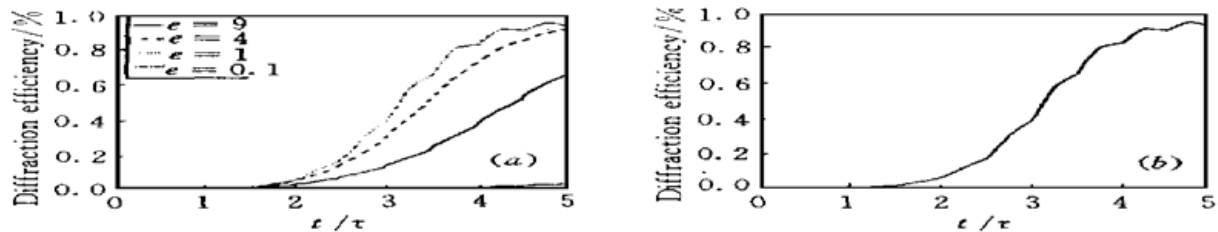


图 8 衍射效率随读栅时间的变化

Fig. 8 Diffraction efficiency as a function of cycle number of readout

(a) $f = 1$, $g_{\max} = 0.01$, $\Gamma L = 10$, $r_0 = 10$, $e = 9, 4, 1, 0.1$; (b) $r_0 = 10$, $g_{\max} = 0.01$, $\Gamma L = 10$, $e = 9$, $f = 1/9$

综上所述, 双面交替读出增强光栅时, 当光折变耦合强度 $\Gamma L = 10$ 时, 如取写栅光强比 $r_0 = 10$, 读栅光脉冲宽度 $t_1 = t_2 = \Delta t = 0.1\tau$, 读栅光强比 $e = 1$, 能使栅强度得到快速有效的增强, 如果 $e \neq 1$, 则可通过取 $f = 1/e$ 来补偿。

参 考 文 献

- 1 F. H. Mok. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 915~ 917
- 2 S. Tao, D. R. Selvah, J. E. Midwinter. Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in an Fe²⁺-LiNbO₃ crystal. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 912~ 914
- 3 Y. Taketomi, J. E. Ford, H. Sasaki *et al.*. Incremental recording for photorefractive hologram multiplexing. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(22): 1774~ 1776
- 4 P. Yeh, C. Gu, C. J. Cheng. Hologram enhancement in photorefractive media. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(8): 2204~ 2212
- 5 S. Campbell, P. Yeh. Optical restoration of photorefractive holograms through self-enhanced diffraction. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3): 330~ 332
- 6 Li Xiaochun, Wu Minxian, Jin Guofan *et al.*. A new holographic data storage architecture capable of fast self-enhancement of the stored gratings. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(11): 1479~ 1485 (in Chinese)
- 7 M. Jeganathan, M. C. Bashaw, L. Hesselink. Evolution and propagation of grating envelopes during erasure in bulk photorefractive media. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1995, **12**(7): 1370~ 1383

Readout of Grating Enhancement in Holographic Storage

Hu Manli Li Yulin Chen Weizong Liu Jifang Zhang Peikun Jia Hongzhi
(Xi'an Institute Of Optics & Fine Mechanics, The Chinese Academy of Science, Xi'an 710068)

Liu Yuhua

(Department of Physics of Foshan University, Foshan 528000)

Abstract The spatial distribution function of grating amplitude recorded in photorefractive crystal based on the couple-waves theory is given. The enhancement properties of holographic grating readout by single-beam and by double-side alternative readout are analyzed after solving the couple-equations numerically. A storage architecture, which includes one crystal and a dynamic holographic refresher (DHR) easily enhanced diffraction efficiency by double-side readout is presented. Meanwhile the optimal architecture parameters to realize the grating enhancement are also given.

Key words holographic storage, grating enhancement, alternative grating