

采用空间-角度复用的盘式三维全息存储*

陶世荃 徐 敏

(北京工业大学应用物理系, 北京 100022)

摘 要 提出基于空间-角度复用技术的盘式三维全息存储方案, 给出这一技术的基本原理, 并采用简化的光线分析方法对该方案的可行性进行分析。研究表明, 这是一种能提供高密度和高数据传输率、而读写系统又相对简单的盘式三维全息存储方案, 具有潜在的应用前景。

关键词 体全息存储, 三维存储盘, 存储容量, 选择性, 球面参考波。

1 引 言

全息存储作为一种光学信息存储技术, 其存储密度理论上可达 $1/\lambda^2$ (面存储) 或 $1/\lambda^3$ (体存储) 的数量级 (λ 是使用的波长), 即对于 $1\ \mu\text{m}$ 的光波长为 $10^8\ \text{bit}/\text{cm}^2$, 或 $10^{12}\ \text{bit}/\text{cm}^3$ 。全息方法将数据页面整页存储和读取, 使数据读取速率大为提高; 加上全息存储具有冗余度高及可并行读取等独特优点, 被认为有潜力与传统磁性存储技术竞争。但是与光盘存储相比, 全息存储的实用化进程较慢。这是因为平面型全息存储的容量并不优于直接照相缩微方法^[1]和光盘存储, 技术上却相对复杂。因而光盘存储以其读写系统与成熟的磁盘存储技术相兼容而率先进入了市场。体全息存储的容量和数据传输速率比现行光盘技术可能高若干个数量级, 有很大的应用潜力, 但为了充分利用其存储能力, 往往需要采用多种复用技术。其中最基本的一种是将空间复用和角度复用相结合形成的所谓分块全息存储(简称 BOHS^[2, 3])。这种技术的存取方式涉及读写头相对记录介质的空间位移以及角度改变, 要求复杂苛刻的光学系统, 并且与现行的磁盘和光盘技术完全不兼容, 因而其实用程度受到限制。

当代计算机技术和光计算技术的迅速发展, 需要有比磁盘和光盘容量更大、速度更高、可并行存取的存储器件, 因而对全息存储器的需求再次提到了日程。近年来该领域中研究活跃, 进展很快。除了角度复用技术日趋成熟外^[4], 还研究了体全息存储的各种复用技术及其组合, 例如位相复用^[5], 波长复用^[6], 稀疏波长-角度复用^[7]等, 采用这些技术无疑能提高存储器的容量和性能, 但它们对激光光源或空间光调制器件的调制范围及调制精度提出严格的要求。最近提出的全息存储盘方案^[8]仍然是在盘状记录材料上采用分块全息存储技术, 因而以上问题仍不能避免。

作者之一曾提出空间-角度复用(简称 SAM)的方案。空间-角度复用将空间复用和角度复

* 国家自然科学基金和北京市自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 2 月 13 日; 收到修改稿日期: 1996 年 8 月 18 日

用以一种新颖的方式结合在一起, 允许相邻的全息图在空间部分地重叠, 而相互间以不同的参考光角度予以鉴别。采用这种方法, 已经在 1 cm^3 体积的 $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ 晶体中存储了 750 幅全息图像, 并且衍射效率比单纯角度复用大为提高^[9-10]。本文在空间-角度复用的基础上提出盘式全息存储方案。该方案能有效地克服已有方案的短处, 充分利用材料的存储能力, 提高存储器性能, 简化存储系统, 使全息存储技术向实用化迈进进一步。

2 空间-角度复用方案的描述

空间-角度复用全息存储方案综合了角度复用体全息存储(可能达到高密度)和空间复用

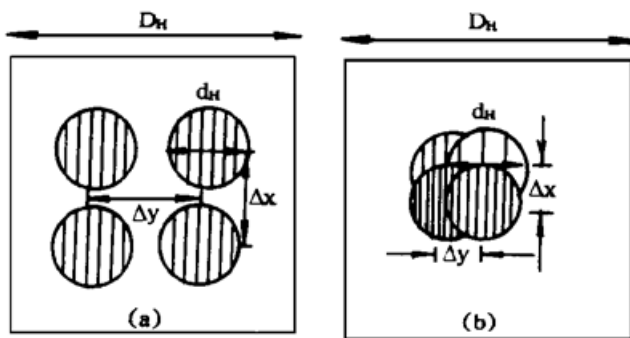


Fig. 1 (a) Spatial multiplexing and (b) spatioangular multiplexing

傅里叶变换全息阵列(可能达到高衍射效率及低串像噪音)二者的优点。采用空间-角度复用方案, 就是把傅里叶变换全息阵列部分重叠地记录在晶体中, 相互间通过采用不同的参考光角度加以区别。设记录介质的尺寸为 D_H , 每个全息图的直径为 d_H , 相邻全息图的间距为 Δ_x 和 Δ_y 。若 $\Delta_x, \Delta_y > d_H$, 则相邻全息图不会重叠, 也就不会有串扰, 但这将限制可存储的全息图数目[见图 1(a)]。缩小间距, 使 $\Delta_x, \Delta_y < d_H$, 全息图会重叠[图 1(b)], 如果各全息图采用相同的参考光来记

录, 对一个全息图的读出操作会使若干个全息图同时读出, 形成严重的“串像”噪音。空间-角度复用在相邻全息图之间引入微小的空间间隔 $\Delta_x, \Delta_y \ll d_H$, 同时又引入参考光束角度的微小改变 $\delta\theta$ ($\delta\theta$ 不小于全息图的选择角) 以避免串像。在文献[10]中取 $\Delta_x = \Delta_y = \Delta$, 定义了空间-角度复用的一维重叠因子 $\mu = d_H/\Delta$, 并证明了 μ^2 是空间-角度复用存储器的局部角度复用度; 又通过与分块全息存储的类比, 定义了空间-角度复用的等效空间复用度 $N_{\text{SAM}} = (D_H/d_H - 1 + 1/\mu)^2$ 。一般而言, 允许 Δ_x 与 Δ_y 不相等, 则两个方向上的重叠因子分别为 $\mu_x = d_H/\Delta_x$ 和 $\mu_y = d_H/\Delta_y$, ($\mu_x, \mu_y \geq 1$)。容易证明, 局部角度复用度为 $\mu_x \mu_y$; 而等效的空间复用度为 $N_{\text{SAM}} = (D_H/d_H - 1 + 1/\mu_x)(D_H/d_H - 1 + 1/\mu_y)$ 。在 $D_H \gg d_H$ 的条件下, $N_{\text{SAM}} \approx (D_H/d_H)^2$ 。于是, 空间-角度复用的存储容量和衍射效率与纯空间复用及纯角度复用相比较的结果仍然与文献[10]中给出的相似, 即:

1) 如果采用纯空间复用方法最多能存储的全息图数目为 $M_{\text{S, max}}$, 则空间-角度复用能存储的全息图数目 M_{SAM} 为

$$M_{\text{SAM}} = \mu_x \mu_y M_{\text{S, max}} \quad (1)$$

2) 在获得相同衍射效率的前提下, 空间-角度复用可存储全息图的数目与纯角度复用的存储数目 M_{ang} 相比为

$$M_{\text{SAM}} = N_{\text{SAM}} M_{\text{ang}} \approx \left[\frac{D_H}{d_H} \right]^2 M_{\text{ang}} \quad (2)$$

3) 若存储相等数目的全息图, 纯角度复用技术的角度复用度是空间-角度复用技术的 N_{SAM} 倍, 而衍射效率随 N_{SAM}^2 而下降。则采用空间-角度复用获得的每个全息图的衍射效率 η_{SAM} 与采用纯角度复用获得的 η_{ang} 之间的关系为

$$\eta_{\text{SAM}} = (N_{\text{SAM}})^2 \eta_{\text{ang}} \approx \left[\frac{D_{\text{H}}}{d_{\text{H}}} \right]^4 \eta_{\text{ang}} \quad (3)$$

以上是作者设计空间-角度复用存储器及评价其性能的主要依据。

实现空间-角度复用存储方案的途径有两种: 平面参考波和球面参考波。如果采用平面参考波, 则记录的每个全息图中各点的参考光角度都相同, 相邻的全息图要使用适当间隔的参考光角度。所有的全息图排成二维阵列。读出时, 由于体全息的角度选择性, 要求读出光的角度与布拉格条件严格匹配, 而各个全息图空间位置的微小失配不会产生串像噪音, 只是使衍射效率略有下降。这种对位置失配不敏感的设计特别适合于光学图像的并行处理系统, 作者已为一种高级次反馈型光学神经网络系统设计了空间-角度复用存储器并进行了初步实验, 在 1 cm^3 的掺铁铌酸锂晶体中记录了 28×28 的全息图阵列, 平均衍射效率为 0.5%, 证实了 (1)~(3) 式的正确性^[10]。

如果采用球面波参考光, 单个全息图上各局部位置产生干涉条纹的参考光角度均不相同, 是位置的函数。读出时, 只有在全息图及参考点源的位置与记录条件严格匹配的情况下才能有正确的读出。如果再现与记录的参考点源已良好匹配, 则全息图空间位置的失配就导致其读出角度偏离布拉格条件。由于空间位置的选择和读出角度的选择是同时完成的, 这种方法特别适合于盘式全息存储。

3 基于空间-角度复用的全息光盘(SAMHD)

3.1 几何分析与 μ 值的确定

在盘状体全息记录材料(例如光折变晶体)中, 用球面参考波记录信息页面的傅里叶变换全息图。每记录一页后, 记录光路不变, 盘面绕中心轴旋转一微小角度, 再记录另一页面, 于是相邻全息图间产生了空间间隔 Δ 和相应的重叠因子 μ 。如果 μ 的取值适当, 使得读出时这一位置失配所对应的角度失配大于全息图的选择角, 则在正确读出一个全息图时, 相邻的全息图不会有显著的读出, 串像噪音受到抑制; 同时又能获得足够大的存储容量和衍射效率, 因而可实现大容量的盘式全息存储, 这就是基于空间-角度复用的全息光盘。

为了正确选择 μ , 采用光线分析的方法来考察盘式全息存储。不失一般性, 考虑厚度为 d 的片状记录材料相对记录光路作一维平动的情形。将坐标原点取在材料的中心, $x-y$ 平面与材料表面平行; z 为厚度方向, 材料占据从 $z = -d/2$ 到 $z = d/2$ 的空间范围, 如图 2 所示。球面参考波源点坐标为 (x_R, y_R, z_R) , 令两写入光的入射平面为 $y-z$ 平面, 则 $x_R = 0$ 。注意在图 2 中, z_R 为负值。考虑平面波类型的物波(由于物光束的傅里叶变换在记录介质处近似为高斯光束的腰部, 这一考虑是合理的), 与 z 轴的夹角为 θ_s 。介质中任一点 (x, y, z) 与球面波源点的距离 $r = r_R [1 + (\rho/r_R)^2 - 2yy_R/r_R^2 - 2zz_R/r_R^2]^{1/2}$, 其中, $r_R = (y_R^2 + z_R^2)^{1/2}$ 为球面波源点到坐标原点的距离; $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ 为全息图上的点到坐标原点的距离。当 $y, z \ll r_R$ 时, 有

$$r \approx r_R + \rho^2/2r_R - (y \sin \theta_R + z \cos \theta_R) \quad (4)$$

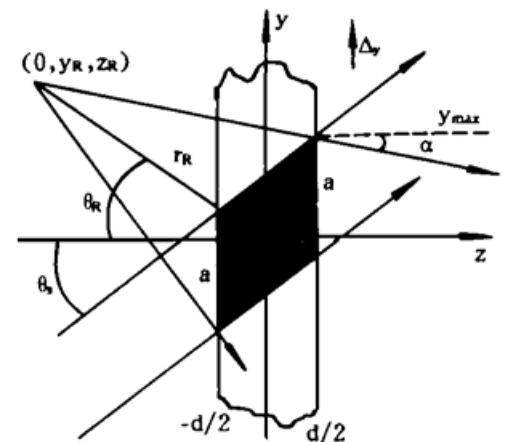


Fig. 2 Geometric analysis of SAMHD

式中 θ_R 为球面波主光线与 z 轴的夹角, 注意在图 2 中此角为负值。

略去常数位相因子, 球面参考波在介质中的复振幅分布可以写为

$$R(x, y, z) = \exp \{jk[\rho^2/2r_R - (y \sin \theta_R + z \cos \theta_R)]\} \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi n/\lambda$ 为介质中光波的传播常数, n 为介质折射率, λ 为空气中的波长。平面物波的复振幅分布为

$$S(x, y, z) = \exp[-jk(y \sin \theta_s + z \cos \theta_s)] \quad (6)$$

考虑准对称光路的透射型全息图, 即 $\theta_R \approx -\theta_s$, 则两波的位相差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi \approx k[\rho^2/2r_R - y(\sin \theta_R - \sin \theta_s)] = k(\rho^2/2r_R - 2y \sin \theta_R) \quad (7)$$

全息干涉条纹空间频率的三个分量分别为

$$v_x = \left| \frac{\partial \Delta\phi}{\partial x} \right| = k \frac{|x|}{r_R}, \quad v_y = \left| \frac{\partial \Delta\phi}{\partial y} \right| = k \left| \frac{y}{r_R} - 2 \sin \theta_R \right|, \quad v_z = \left| \frac{\partial \Delta\phi}{\partial z} \right| = k \frac{|z|}{r_R}.$$

不难看出, v_x 和 v_z 的最小值均为零, 分别出现在 $x = 0$ 和 $z = 0$ 处。由于 $v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2} > |v_y|$, 因此, 以 $|v_y|$ 的最小值 $v_{y\min}$ 作为条纹空间频率的最小值来计算沿 y 方向的选择角是有充分的余地的。由图 2 可见, $v_{y\min}$ 发生在全息记录斑的最上缘 y_{\max} 处。如果全息斑的半径 a 是由参考光束的尺寸确定的, 则有 $y_{\max} = a$ 。设该局部的参考光角度为 α , 则

$$\tan \alpha = \frac{y_R - a}{Z_R - d/2} \quad (8)$$

注意 $\alpha < 0$, 而此处两写入光束之间的夹角 $2\Phi = \theta_s - \alpha$ 。定义全息图的选择角 $\Delta\Theta$ 为衍射效率对读出角度失配的曲线^[11] 中主瓣的全角宽, 因而沿 y 方向此全息图选择角的最大值 $\Delta\Theta_{\max}$ 为

$$\Delta\Theta_{\max} = \frac{2\lambda \cos \theta_s}{nd \sin(\theta_s - \alpha)} \quad (9)$$

进而计算得

$$\Delta\Theta_{\max} = \frac{2\lambda}{nd} \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{\tan \theta_s - \tan \alpha} \quad (10)$$

为了实现这一角度失配所要求的全息图沿 y 方向的空间间隔 Δ_y 为

$$\Delta_y = (|z_R| + \frac{d}{2}) \frac{2\lambda (1 + \tan^2 \alpha)^{1/2}}{nd \tan \theta_s - \tan \alpha} \quad (11)$$

因而沿 y 方向(盘面的切线方向)的重叠因子为 $\mu_y = 2a/\Delta_y$ 。固定记录光路, 使记录光束的入射平面垂直于各盘面上记录位置处的盘半径。每记录一页后将盘面旋转一微小角度 $\Delta\phi$, 使相邻全息记录之间沿 y 方向产生相应的线性位移 Δ_y , 然后便可存储另一页。读出时, 只要盘面旋转到正确的位置, 就可以读出一页, 其它页面不会产生显著的串像噪音, 因而实现较为简单的盘式三维全息存储。盘式全息存储示意图如图 3 所示。

3.2 存储容量的估算

设盘面半径 R 为全息斑直径 $2a$ 的整数倍, 全息图记录在同心而互不重叠的环形区域, 第 l 个环的半径为 $r_l = 2al$ ($l = 1, 2, \dots, L$), l 的最大值 L 取为 $L = (R/2a) - 1$, 如图 4 所示。环内相邻全息图的空间间隔 Δ_y 由(11)式确定, 则对应的角度间隔 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = \frac{\Delta_y}{r_l - a} = \frac{\Delta_y}{(2l - 1)a} \quad (12)$$

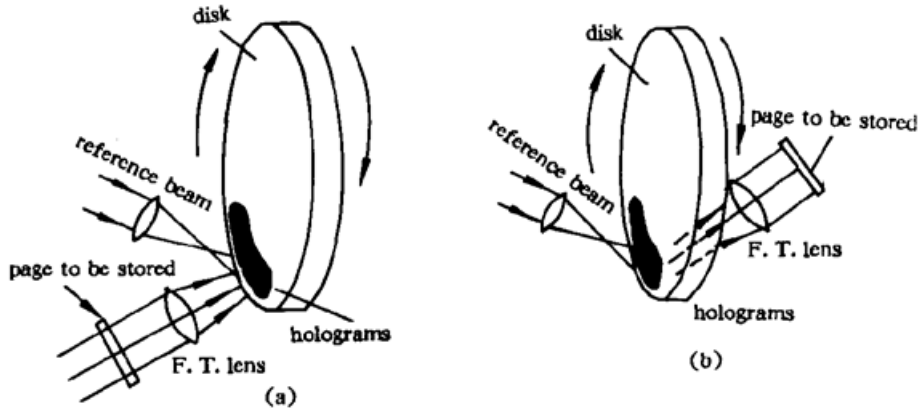


Fig. 3 Schematic diagrams showing (a) recording and (b) readout of a SAMHD

令同一圆环中的全息图首尾不相重叠, 则该环中可以存储的全息图数目为

$$M_l = \frac{2\pi r_l - 2a}{r_l \Delta\phi} \approx \mu_y (2\pi l - \pi - 1) \quad (13)$$

将各环中可存储的全息图数目求和可得总的全息图数 M :

$$M = \sum_l M_l = \mu_y L (\pi L - 1) \quad (14)$$

(14) 式即为按全息图数目表示的存储容量。为了估算空间-角度复用全息光盘的存储容量, 举一个简单而可以实现的实例。设 $z_R = -40 \text{ mm}$, $a = 1.0 \text{ mm}$, $d = 5.0 \text{ mm}$, $\theta_s = -\theta_R = 15^\circ$; 并取 $n = 2.2$, $\lambda = 488 \text{ nm}$ 。由 (8) 式和 (11) 式计算得 $\Delta_y = 8.4 \mu\text{m}$, 于是得到一维重叠因子 $\mu_y = 238$ 。由 (1) 式可知, 即使在径向 (x 方向) 完全不重叠 ($\mu_x = 1$), 此空-角复用全息光盘比二维全息存储盘存储的全息图数目也可扩大 238 倍。若此全息盘的半径为 $R = 20 \text{ mm}$, 则可使用的圆环数为 $L = 9$, 按 (14) 式计算得存储全息图总数不少于 5.84 万幅, 相当于 39 min 的视频图像。相应地, 若每个全息图存储 10^6 位 (这在光学存储的极限以内), 则按位计算的存储容量不低于 58.4 Gbit, 存储的面密度不低于 $51 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ 。通过对存储参数的优化, 并采用更厚的存储介质, 还可进一步提高存储容量。由于本例中的局部角度复用度 ($\mu_x \mu_y = 238$) 远比文献 [8] 提出的方案中对于 1 cm 厚的晶体所采用的角度复用度 (1000) 为小, 空-角复用全息光盘的衍射效率和信噪比将均有显著的改善。

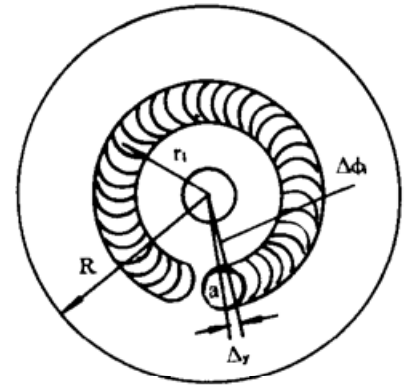


Fig. 4 Schematic diagram for calculation of storage capacity of SAMHD

3.3 对调节机构的要求

采用空间-角度复用全息光盘方案, 将全息图存储在紧密排列而互不重叠的环形区域中, 有限尺寸的盘面容纳的环形数目十分有限 (通常 L 小于 10)。由于读出光的球面波性质, 径向定位的误差所引起的环间串像会比平面读出光波的情形要小得多。这使对盘面径向寻址机构只须为读写头提供有限数目的径向位置, 且定位精度要求大为降低。

在同一环形区域, 相邻全息图间的位置间隔通过盘面的微小角度旋转而实现。由 (12) 式可见, 不同环形的旋转角 $\Delta\phi$ 是不同的。其最小的转角 $\Delta\phi_{\min}$ 发生在最外面的环形即 $l = L = R/2a - 1$ 处。因此, $\Delta\phi_{\min} = \Delta_y / (R - 3a)$ 。通常 $\Delta_y \geq 5 \mu\text{m}$, $R - 3a \leq 20 \text{ mm}$, 故 $\Delta\phi_{\min} \geq 0.25 \text{ mrad} = 0.014^\circ$ 。精密微动定位装置的当前水平 (例如, Newport URM 系列转台的分辨率

和重复性均不劣于 0.002° 完全可以胜任这一调节要求。

结 论 全息存储盘利用了页面存取方式的光学并行性, 缓解对存储介质寻址时高速机械运动的要求, 极大地提高数据传输率。三维全息存储盘的存储容量比现行光盘技术可望提高 2 ~ 3 个数量级。作者提出的空-角复用全息光盘方案可进一步简化存储和读出的光学系统, 使光学读出头的寻址方式易于与现行光盘系统兼容, 有利于盘式三维全息存储的实现。

参 考 文 献

- [1] E. G. Ramberg, Holographic information storage. *Radio Corporation of America Rev.* 1972, **33** : 5~53
- [2] R. G. Zech, Volume hologram optical memories, mass storage future perfect? *Opt. & Photonics News*, August 1992, 16~ 25
- [3] L. d'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak *et al.*, Experimental holographic read-write memory using 3-D storage. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(4) : 808~ 818
- [4] F. H. Mok, Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate. *Opt. Lett.*, 1993, **18** (11) : 915~ 917
- [5] C. Denz, G. Pauliat, T. Tschudi, Potentialities and limitations of hologram multiplexing by using the phase-encoding technique. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(26) : 5700~ 5705
- [6] G. A. Rakuljik, V. Leyva, A. Yariv, Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(20) : 1471~ 1473
- [7] Scott Campbell, Xianmim Yi, Pochi Yeh, Hybrid sparse-wavelength angle-multiplexed optical data storage system. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24) : 2161~ 2163
- [8] Hsin-Yu Sidney Li, Demetri Psaltis, Three-dimensional holographic disks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17) : 3764~ 3774
- [9] S. Tao, D. R. Selviah, J. E. Midwinter, Spatioangular multiplexed storage of 750 holograms in an Fe·LiNbO₃ crystal. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11) : 912~ 914
- [10] S. Tao, Z. H. Song, D. R. Selviah *et al.*, Spatioangular multiplexing scheme for dense holographic storage. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(29) : 6729~ 6737
- [11] H. Kogelnik, Coupled-wave theory for thick hologram gratings. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, **48**(9) : 2909~ 2947

Spatioangularly-Multiplexed Three-Dimensional Holographic Disks

Tao Shiquan Xu Min

(*Applied Physics Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*)

(Received 13 February 1996; revised 18 August 1996)

Abstract A new three-dimensional holographic disk scheme based on the spatioangular multiplexing is proposed. The principle and feasibility of this scheme are analysed by using a simplified ray-optics method. It is shown that this scheme has potential applications for implementing holographic storage with a high capacity and high data transfer rate, as well as a relatively simple read/write system.

Key words volume holographic storage, 3-D storage disks, storage capacity, selectivity, spherical reference beams.