

文章编号: 1002-2082(2008)03-0469-04

# 光路几何配置对体全息存储角度复用度的影响

王小怀

(韩山师范学院 物理与电子工程系, 广东 潮州 521041)

**摘要:** 利用耦合波理论对体全息存储角度复用方式的基本原理进行了讨论, 分析了对称写入、非对称写入及邻面写入等不同光路几何配置对角度复用度的影响。考虑存储介质临界角的限制, 推导出最大角度复用度的计算公式。理论分析及数值模拟表明: 非对称入射光路比对称入射光路更有利于提高系统的角度复用度; 邻面入射光路的角度复用度最高且与参考光入射角改变量成正比, 邻面入射光路是最佳的角度复用存储光路。

**关键词:** 体全息存储; 角度复用; 光路几何配置; 衍射效率

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

## Influence of beam path geometrical arrangement on angular multiplex density in volume holographic storage

WANG Xiao-huai

(Department of Physics and Electronic Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

**Abstract:** Based on coupled-wave theory, the fundamental principle of angular multiplex in volume holographic storage is discussed. The influence of the different beam path geometric arrangements, such as symmetrical write, unsymmetrical write and near-plane write, on the angular multiplex density was analyzed. Considering the limitation of total reflection about storage material, the equation of maximum angular multiplex density was derived. The theoretical analysis and digital simulation results indicate that the unsymmetrical incident light path has a higher angular multiplex density than the symmetrical one, and the angular multiplex density of the near-plane incident beam path is the best and is directly proportional to the reference beam.

**Key words:** volume holographic storage; angular multiplex; beam path geometrical arrangement; diffraction efficiency

## 引言

体全息存储技术突破了传统磁光记录的衍射极限, 并将传统的二维面存储发展到三维体存储, 被认为是最有可能成为新一代的海量存储技术。角度复用是体全息存储最重要的复用技术之一, 角度复用度的高低很大程度上决定了系统的存储容量。本文将探讨体全息存储系统的角度复用度与光路

几何配置之间的关系, 以寻求最佳的角度复用存储光路。

## 1 体全息图的角度选择灵敏度

根据 Kogelnik 的耦合波理论, 无吸收透射体全息图的衍射效率<sup>[1-2,4]</sup>为

收稿日期: 2007-04-25; 修回日期: 2007-05-15

基金项目: 韩山师范学院 2005 年度青年科学基金(200508)

作者简介: 王小怀(1974—), 男, 广东揭阳人, 韩山师范学院物理与电子工程系实验师, 硕士, 主要从事物理实验教学及光全息学方面的研究。E-mail: xiaohuaihs@126.com

$$\eta_i = \frac{\sin^2(v^2 + \xi^2)^{1/2}}{1 + (\xi/v)^2} \quad (1)$$

其中

$$v = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}} \quad (2)$$

式中:  $\Delta n$  为折射率调制度;  $d$  为晶体的厚度;  $\lambda$  为作用光在真空中的波长;  $\theta_r$  和  $\theta_s$  则对应晶体中的读出角和衍射角。

Bragg 失配量为

$$\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s} \quad (3)$$

相位失配量为

$$\delta = \Delta \theta \sin(\Phi - \theta_0) - \Delta \lambda K^2 / 4\pi n_0 \quad (4)$$

式中:  $\Phi$  为光栅的倾斜角;  $\Delta \theta$  为实际入射角对布拉格入射角  $\theta_0$  的偏离;  $\Delta \lambda$  为波长对布拉格波长  $\lambda_0$  的偏移量;  $K$  为光栅矢量的大小。

根据(1)式作出的  $\eta$ - $\xi$  变化曲线如图1所示。由图1可见,体全息图的衍射效率对 Bragg 失配量  $\xi$  十分敏感。对于纯角度复用,当  $\Delta \theta$  达到某种程度时,  $\eta$  将下降至零。此时有

$$v^2 + \xi^2 = \pi^2 \quad (5)$$

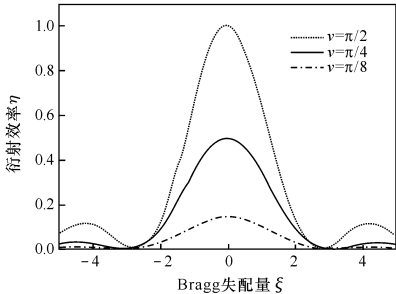


图1 衍射效率  $\eta$  随 Bragg 失配量  $\xi$  的变化曲线

Fig.1 Variation of diffraction efficiency  $\eta$  with Bragg mismatch quantity  $\xi$

将(3)式和(4)式代入(5)式得到透射光栅选择角的表达式

$$\theta_i = \frac{2(\pi^2 - v^2)}{\pi n d} \cdot \frac{\cos \theta_s}{|\sin(\theta_r - \theta_s)|} \quad (6)$$

## 2 存储系统的角度复用度

存储时,只要相邻全息图的角间隔不小于选择角  $\theta$ ,则可实现用纯角度复用的方式在同一体积内存储多幅全息图。选择角  $\theta$  越小,角度复用度  $M_{\text{ang}}$  越高<sup>[3,5-6]</sup>。下面讨论不同几何光路配置对角度复用

度的影响。

### 2.1 非对称写入情形

非对称入射光路如图2所示。将物光固定,即  $\theta_s$  保持不变,通过改变参考光入射角  $\theta_r$  实现多重存储,这种非对称的写入光路将记录介质形成倾斜光栅。设存储介质的临界角为  $\theta_c$ ,则  $\theta_r$  的最大可变范围为  $(\theta_s \sim \theta_c)$ ,该范围所允许的角度复用度为

$$M_{\text{ang}} = \int_{\theta_s}^{\theta_c} \frac{\pi n d \sin(\theta_r - \theta_s)}{(\pi^2 - v^2)^{1/2} \lambda \cos \theta_s} = \frac{\pi n d}{2(\pi^2 - v^2)^{1/2} \lambda \cos \theta_s} \times [1 - \cos(\theta_c - \theta_s)] \quad (7)$$

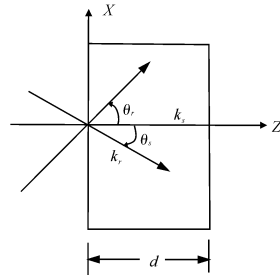


图2 非对称入射光路

Fig.2 Unsymmetrical incident beam path

严格地讲,  $v$  与  $\theta_r$  和  $\theta_s$  有关,但由图1可见,不同的  $v$  值,曲线的主瓣宽度相差不大,因此(7)式的积分过程中近似地把它看成与  $\theta_r$  和  $\theta_s$  无关。以下两种情形也作如此近似。

### 2.2 对称写入情形

若图2中的  $\theta_s = -\theta_r$ ,即物光和参考光对称入射,则构成对称入射光路,此时记录介质形成非倾斜光栅。(6)式可改写为

$$\theta_i = \frac{(\pi^2 - v^2)^{1/2} \lambda}{\pi n d \sin \theta_r} \quad (8)$$

在参考光最大可变范围  $(0 \sim \theta_c)$  内的角度复用度为

$$M_{\text{ang}} = \int_0^{\theta_c} \frac{\pi n d \sin \theta_r}{(\pi^2 - v^2)^{1/2} \lambda} d\theta_r = \frac{\pi n d}{(\pi^2 - v^2)^{1/2} \lambda} (1 - \cos \theta_c) \quad (9)$$

### 2.3 邻面写入情形

邻面写入方案是使2束写入光从存储晶体互相垂直的相邻表面正入射,在介质内2光束夹角近似为  $90^\circ$ ,如图3所示。若固定物光,仅通过改变参考光入射角  $\theta_r$  实现多重存储,则上述对非对称写入情形分析所得出的结论同样适合邻面写入情形,只

不过最大积分范围变成了 $[-(\pi/2 + \theta_c) \sim -(\pi/2 - \theta_c)]$ 。

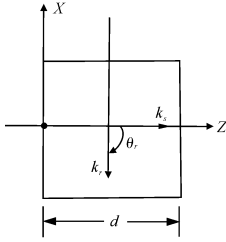


图3 邻面入射光路

Fig. 3 Near-plane incident beam

### 3 数值模拟及分析

为了更直观地反映光路几何配置对体全息角度复用度的影响,根据以上分析结果,分别对3种配置光路进行数值模拟并作出相应的关系图线,如图4所示。计算采用的参数如表1所示<sup>[7]</sup>。

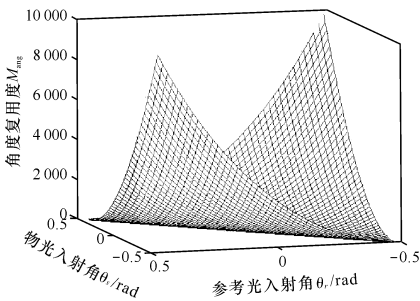


图4 非对称入射时角度复用度  $M_{ang}$  随  $\theta_r$  和  $\theta_s$  变化曲线

Fig. 4 Variation of angular multiplex density  $M_{ang}$  with  $\theta_r$  and  $\theta_s$  when unsymmetrical incidence is occupied

表1 理论计算所采用的参数

Table 1 Values applied to theoretical calculation

$\lambda/\text{nm}$	$d/\text{mm}$	$n$	$\Delta n$
532	10	2.2	$10^{-5}$

由图4可以看出,角度复用度  $M_{ang}$  随  $\theta_r$  或  $\theta_s$  的变化而变化,只有当物光入射角  $\theta_s$  处于  $\theta_c$  或  $-\theta_c$  位置时角度复用度  $M_{ang}$  才能达到最大值。为了方便比较,将物光入射角  $\theta_s$  固定在  $-\theta_c$  位置,作出对称和非对称入射光路的  $M_{ang}-\theta_r$  关系曲线,如图5所示。

由图5可见,非对称光路的最大角度复用度约为对称入射光路的2倍;另外,2种光路的角度复用度与参考光入射角改变量之间均存在明显的非线性关系。

性关系。

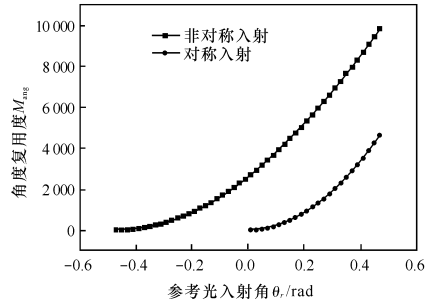


图5 对称和非对称入射光路的  $M_{ang}-\theta_r$  关系曲线

Fig. 5 Angular multiplex density  $M_{ang}$  versus  $\theta_r$  of symmetrical and unsymmetrical incident beam paths

邻面入射光路的  $M_{ang}-\theta_r$  关系曲线如图6所示。图6中最高角度复用度比对称入射光路提高了近4倍,并且其角度复用度和参考光入射角改变量之间存在线性关系。

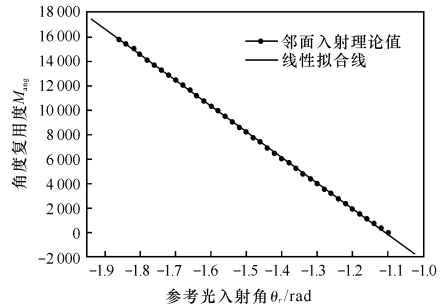


图6 邻面入射光路的  $M_{ang}-\theta_r$  关系曲线及线性拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of angular multiplex density  $M_{ang}$  and  $\theta_r$

对邻面入射理论计算值进行线性拟合处理,拟合参数值及误差如表2所示。角度复用度  $M_{ang}$  随参考光入射角  $\theta_r$  变化的方程为

$$M_{ang} = A + B\theta_r \quad (10)$$

表2 拟合参数及误差

Table 2 Parameters and fitting errors

参数	参数值	拟合误差
截距 $A$	-23 091.56	49.69
斜率 $B$	-20 867.29	31.17
相关系数 $r$	-0.999 95	

### 4 结论

体全息存储的角度复用度与写入光路的几何

配置密切相关,合理的几何光路配置将有利于提高角度复用度,从而提升系统的存储容量。对称光路虽然在体全息存储理论分析中用得最多,但角度复用度大小及变化的均匀性却最差。此外,对称记录不同全息图时需同时改变物光和参考光的入射角,这进一步限制了其实际应用。非对称入射光路有利于提高角度复用度,并且复用时可保持物光入射角不变,但受存储介质全反射的限制,角度复用度无法达到最高,变化也不均匀。邻面入射光路能达到最高的角度复用度,而且其角度复用度与参考光入射角改变量成正比,对提高系统的存储容量以及控制各全息图的均匀衍射效率都具有重要意义,是最佳的角度复用存储光路。

#### 参考文献:

- [1] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick holograms gratings[J]. Bell Syst. Tech. J., 1969, 48(9):2909-2947.
- [2] RASTANI K. Storage capacity and cross talk in angularly multiplexed holograms; two case studies [J]. Applied Optics, 1993, 32(20):3772-3777.
- [3] ZHOU Han-ying, ZHAO Feng, YU T S. Angle-dependent diffraction efficiency in a thick

photorefractive hologram [J]. Applied Optics, 1995, 34(4):1303-1309.

- [4] 刘思敏,郭儒,凌振芳. 光折变非线性光学[M]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- LIU Si-min, GUO Ru, LING Zhen-fang. Photorefractive nonlinear optics [M]. Beijing: China Standard Press, 1992. (in Chinese)
- [5] 陶世荃,王大勇,江竹青,等. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998.
- TAO Shi-quan, WANG Da-yong, JIANG Zhu-qing. Optical holographic storage [M]. Beijing: Beijing Industry University Press, 1998. (in Chinese)
- [6] 王小怀,李卓凡,忽满利. 高密度体全息存储性能与几何组态的关系[J]. 应用光学, 2005, 26(2):10-14.
- WANG Xiao-huai, LI Zhuo-fan, HU Man-li. The relation between recording-geometry and property of dense volume holographic storage [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(2):10-14. (in Chinese)
- [7] 王小怀. 基于体全息技术的波分解复用(WDM)器件研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4):350-354.
- WANG Xiao-huai. Study on the demultiplex of WDM based on volume holographic technology [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4):350-354. (in Chinese)