

用光折变晶体制作的消像散体全息 阵列照明器*

翟宏琛 许剑* 战元龄* 关驰* 高胜泉
(南开大学现代光学研究所 * 南开大学物理系, 天津 300071)

提要 报道一种使用光折变晶体作为记录材料,可一步实现的消像散体全息阵列照明器。根据记录波长与再现波长,计算出最佳的记录角度与再现角度,使再现时由于记录与再现波长不同引起的像散得到补偿。

关键词 像散,阵列照明器,体全息,光折变晶体

1 引言

阵列照明器(Array Illuminator, 简称 AI)可用于光计算及光学信息处理系统中,提供光学处理器中各个单元的等光强的照明,时钟分布信号或作为这些系统的输入成像阵列。随着微型光学和光学元件集成化的发展,阵列照明器还可用于提供信号传递载体,因此具有重要作用。

常见的 AI 折射型有透镜阵列, Damman 光栅, Talbot 效应, 针孔及二元光学元件等阵列照明器。透镜阵列的制造工艺复杂, 造价高, 而且对于某一阵列间距只有一特定的最佳焦距; Talbot 效应 AI 的成像距离及光能利用率均受到阵列设计形状的影响; 针孔 AI 的光能利用效率极低; Damman 光栅具有相对较高的衍射效率, 制作简单, 但当 AI 规模增大时衍射效率及制作都会面临很大限制, 因此不宜制成大规模的 AI。二元光学元件的制造对工艺以及设备上要求极高, 国内尚不能制造成大规模的 AI, 特别是应用在短波段难度更大。

采用体全息方法制造 AI, 一方面造价低, 性能稳定, 同时由于体全息记录的是位相信息, 因此再现时光能损失小, 可以达到接近 70% 的效率(高于普通的 Damman 光栅), 并且不受制造规模的限制, 宜制成大规模的(100×100)AI。另外, 由于布喇格条件的限制, 对设计范围以外再现参考光波不产生衍射, 呈透明状态。特别适用于多路光输入的光学信息处理过程中作互连元件使用。

但在实际应用中, 由于全息记录材料只对某一段光波敏感, 与大多数光电元件的敏感区不尽相同, 因此产生由此引起的像散及其他问题。Hans Peter Herzing^[1] 等人实现了消像散离轴全息透镜的制造方法并进行了理论分析。M. Assenheimer^[2] 等人也提出了一种分两步完成的用于补偿由于记录光波有别于再现光波而产生像散的全息元件的设计原理。但以上这些工作仅

* 国家教委资助项目。

收稿日期: 1994年6月20日; 收到修改稿日期: 1994年11月24日

涉及了普通的全息元件,而且要有中间步骤,需要使用不同的波长进行两次以上的全息记录与再现。将以上方法应用于大规模的 AI 制作时会遇到不少实际困难和问题。因此,不适用于大规模的 AI 应用。为此,本文作者^[3]曾提出了一种简单的使用体全息技术的 AI 制备新方法。使用此 AI 不但具有高的衍射效率,同时能够消除记录光波与再现光波波长不同而引起的畸变。本文对这种理论进行了分析和补充,使理论更加完善。

本文在改进理论下首次使用光折变晶体作记录材料,成功制成消像散体全息阵列照明器。该 AI 对不满足布喇格条件的光波呈透明状态,特别适用于多光路输入的互连系统。

2 理论分析与实验条件

用全息方法制作阵列照明器是将设计的阵列图像模板的衍射波与离轴参考波的干涉条纹记录下来。当再现参考波从与记录参考波共轭的方向照阵列照明器时,则会得到模板的实像如图 1 所示。

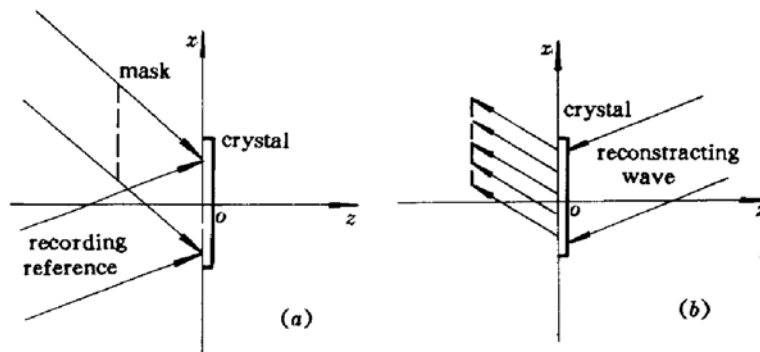


Fig. 1 Operation of the holographic array illuminator

(a) recording; (b) reconstruction

2.1 最佳记录平面的选择

为提高光能的有效利用率,可使用相位体全息的记录方法。对于平面波,理论上的效率可达到 100%,因此适当选择记录平面与模板的距离,使记录平面处光强分布变化达到最小值,则记录的主要是位相变化信息。这样可使再现时的衍射效率达到最大。根据文献[4]的计算方法,当模板选用 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的正方形像素,周期为 $300 \mu\text{m}$ 时,该最佳记录平面位于模板后 3.1 cm 和 15.3 cm 两处。

2.2 记录角度的选择

通过对记录角度的选择,可以实现消像散的再现,该消像散记录角度的选择,可通过文献[1,3]的公式推出。

若 $\theta_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 分别为空气中物波、记录参考波、再现参考波及再现波的传播方向与记录平面法线的夹角, $\theta'_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 分别为晶体内物波、记录参考波、再现参考波及再现波与记录平面法线的夹角, θ_i 和 θ'_i 满足

$$\sin\theta_i = n_1 \times \sin\theta'_i \quad (i = 0, 1) \quad (1)$$

$$\sin\theta_i = n_2 \times \sin\theta'_i \quad (i = 2, 3) \quad (2)$$

其中 n_1, n_2 分别为晶体对记录光和再现光的折射率。由于波长不同, n_1 和 n_2 一般并不相等。这两个方程是文献[3]未考虑的,其结果必然发生很大偏差。假定物点、记录参考点和读出点源都在 $y = 0$ 平面上,则可得到共轭像点的角度关系如下

$$\sin\theta'_3 = \sin\theta'_2 + \frac{\lambda'_2}{\lambda'_1}(\sin\theta'_1 - \sin\theta'_0) \quad (3)$$

消像散的关系应满足^[1]

$$\frac{\sin\theta'_0}{\sin\theta'_3} = 1 \quad (4)$$

同时,为获得更高的衍射效率,读出光必需满足布喇格条件。对本实验的情况,布喇格条件应具有以下形式

$$\sin\left[\theta'_2 - \pi - \frac{\theta'_1 + \theta'_0}{2}\right] = (\lambda'_2/\lambda'_1)\sin\left[\frac{\theta'_1 - \theta'_0}{2}\right] \quad (5)$$

由以上五式,可以确定消像散条件下的物光、记录参考光、再现参考光和再现光入射角度的关系。在本实验中,若记录光波长取为 $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$,再现光波长取 $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$, $n_1 = 2.34$, $n_2 = 2.28$,记录参考波与物波之间的夹角取 45° ,则可算出 θ_0 为 3.37° 或 6.86° 。

3 实验结果

由于制作条件的限制,本实验用的记录模板是仅具有 20×20 个像素的二维阵列,其像素大小为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的正方形,周期为 $300 \mu\text{m}$ 。记录时,Ar 离子激光($\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$)被分成两束光,然后再扩束。这样避免了先扩束而引起的大规模使用镜面,其表面不均匀带来的杂散光和光束平行性的下降。实验光路如图 2。

参考波和物波的夹角为 45° ,即 $\theta_1 - \theta_0 = 45^\circ$,这个角度在整个实验中是不变的。取 $\theta_0 = 3.37^\circ$ 。记录时,满足用 $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$ 的激光再现消像散的条件。本实验选用 $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 晶体作为记录材料, $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$ 是相位体全息材料,具有较高的衍射效率,记忆时间长,操作简便,无需复杂的化学过程。晶体厚度为 0.5 mm , Q 值为 1245 ,记录时模板距晶体 3.1 cm ,满足最佳记录平面位置。再现时,取 $\theta_2 = 123^\circ$,满足布喇格条件。图 3 为用以上条件所得的再现像。

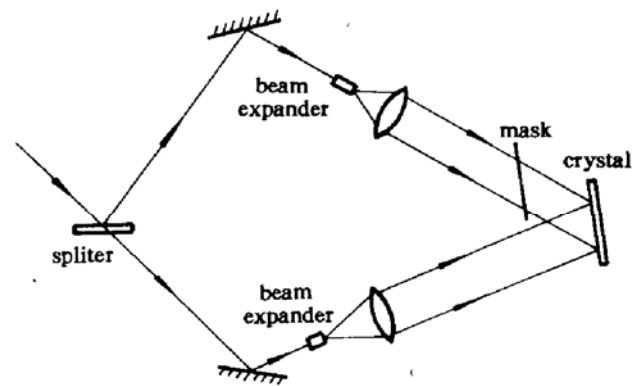


Fig. 2 Recording setup of the hologram

为进行对比,我们在 $\theta_0 = 4^\circ$ 的记录条件下作了另一次记录,即不满足用 $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$ 时消像散的条件。这时如果用 $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$ 的再现波再现,由于波长的改变,引起像散的出现,如图 4 所示。我们对此次再现的 f_{\perp}/f_{\parallel} 值进行了测量,其值为 2.2 ,此结果与根据(1~5)式计算的结果(见图 5)相符。

为证明此像散是由于波长改变而引起的,我们用 $\lambda_1 = \lambda_2 = 488.0 \text{ nm}$ 进行了又一次再现。由于记录与再现波长相同,不存在由于波长不同引起的像散问题,如图 6 所示。可以看出,符合消像散条件的再现像图 3 与使用相同波长进行记录和再现的结果(图 6)基本一致。

实验还验证,再现记录像的同时,以不满足布喇格条件的光波照射该全息图时,该全息图对此类光波不产生衍射。这表明该阵列照明器对满足布喇格条件以外的光波不产生影响,故可用于多光路输入的互连系统中,其结果将另文报道。

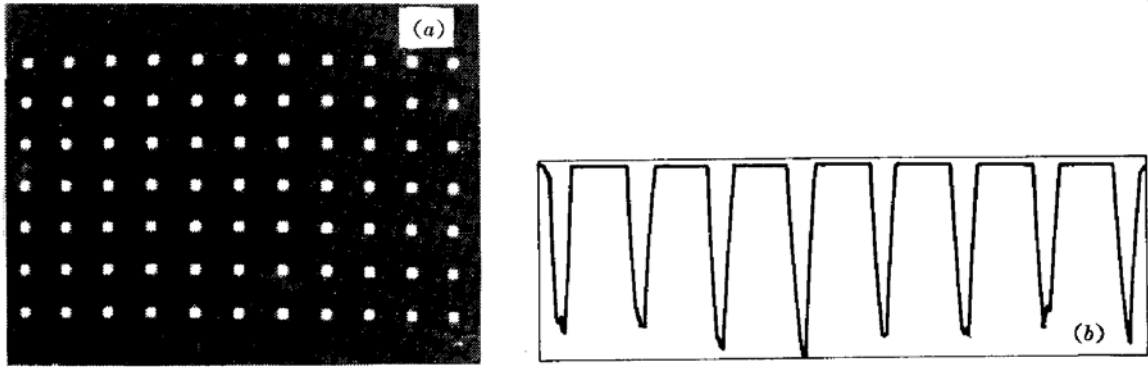


Fig. 3

(a) reconstructed image without aberration due to the wavelength change;
 (b) the intensity distribution of the reconstructed image. $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$

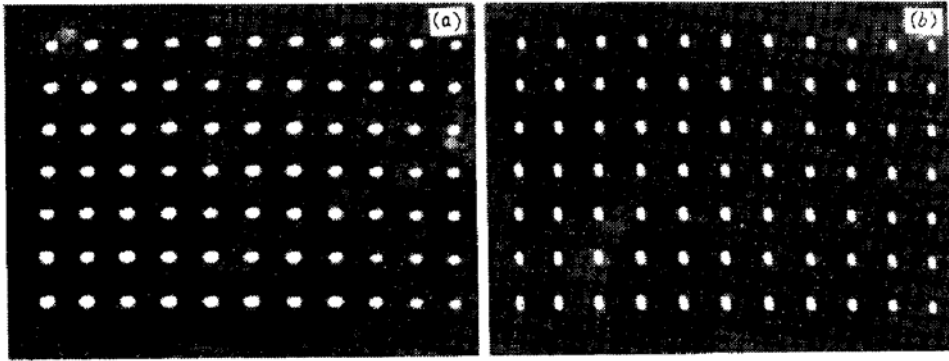


Fig. 4 Reconstructed image with aberration due to the wavelength change
 $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$. (a) $f = f_{\parallel}$; (b) $f = f_{\perp}$

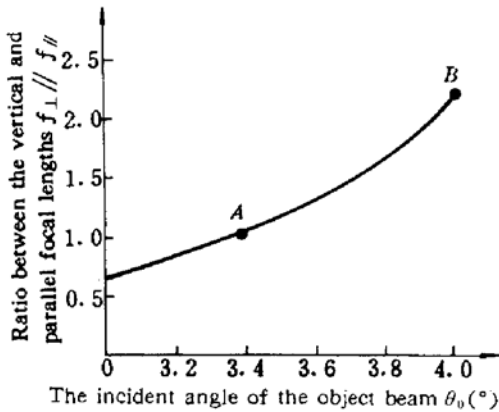


Fig. 5 The ratio between the vertical and parallel focal lengths as a function of θ_0

A: $\theta_0 = 3.37^\circ$, $f_{\perp}/f_{\parallel} = 1$, corresponding to Fig. 3 (a)
 B: $\theta_0 = 4.00^\circ$, $f_{\perp}/f_{\parallel} = 2.2$, corresponding to Fig. 4

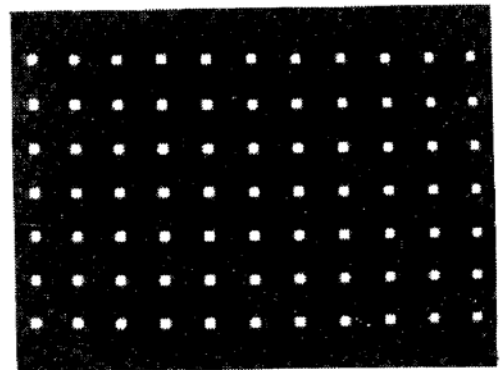


Fig. 6 Reconstructed image using the same wavelength as recording reference. $\lambda_1 = \lambda_2 = 488.0 \text{ nm}$

4 讨论与总结

本文涉及的有关畸变的讨论仅为三阶误差理论中的像散部分。更高阶的畸变及其他像差，由于理论和实验的困难，不包括在本文所讨论的范围内。我们的着眼点仅在于从实际应用角度

出发,制造出一种实用的阵列照明器,使其成像质量不因记录与再现波长不同而变差,从我们的实验结果(图 3)来看,由于 $f_{//}$ 与 f_{\perp} 重合得如此之好,以致于在我们实验的条件下无法分辨它们的距离。因而只得到了如图 3 给出的再现像。这个再现像与图 6 所示记录与再现使用同一波长的再现像的质量基本一致,无法分辨它们之间的质量区别。

由实验结果可以看出,应用光折变晶体制造全息阵列照明器可以消除因记录与再现波长不同而引起的像散。本文提出的方法简单,使用可靠,实验结果与理论分析完全吻合。如果具备有 100×100 的模板,不难实现相应规模的阵列照明器。根据文献[4,5]的计算结果和实验报道,实用光折变晶体记录位相体全息时衍射效率可以达到或接近 70%。在我们的实验中,测得的效率为 60%。其原因除了光源、模板以及晶体等因素外,实际模板尺度较小也是因素之一。如果能够解决制作较大规模模板的技术问题,则实验条件与理论更接近一致,效果会更好。这也从另一方面表明此方法特别适用于制造大规模阵列照明器的独特之处。

使用光折变晶体的另一优越性在于高效率地利用光能,抑制了杂散光,而且操作十分简单,无需复杂的控制设备和化学处理。

从图 3(a) 和 (b) 中可以发现,各个像素的光强稍微有些差别,这可能与以下因素有关:(1) 记录光的不均匀性;(2) 再现光的不均匀性。

最后应当特别指出,本文提出的方法不仅仅局限于制作大规模的阵列照明器,更重要的是这一方法对任何物体的全息记录和再现都普遍适用,因此在全息术中补偿记录与再现波长不同而引起的像散具有普遍的理论 and 实际价值。

致谢 本文所用的模板是天津缩微公司袁维本教授亲自制作的,特向袁先生表示深切的感谢。参加本工作的还有张铁群,相翔鹏等同志。

参 考 文 献

- 1 Hans Peter Herzing. Holographic Optical Elements(HOE) for Semiconductor Laser. *Opt. Commun.*, 1986, **95**(3): 144~148
- 2 M. Assenheimer, Y. Amitai, A. A. Frisem. Recursive design for an efficient HOE with different recording and readout wavelengths. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(22): 4747~4752
- 3 H. C. Zhai, P. Chavel, I. Seyd-darwish *et al.*. Holographic array illuminator with high diffraction efficiency and low aberration. *Opt. Commun.*, 1993, **102**(5,6): 414~420
- 4 I. Seyd-darwish, P. Chavel, J. Taboury. Recording condition of an array illuminator holographic based on the talbot effect. *Appl. Opt. Dec.*, 1993, **32**(35): 7135~7144
- 5 许京军,刘思敏,武原庆等. $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中衍射效率的测量. *物理学报*, 1991, **40**(9): 1443~1447

The Implementation of a Volume Holographic Array Illuminator with a Refractive Crystal

Zhai Hongchen Xu Jian* Zhan Yuanling* Guan Chi* Cao Shengquan
(Modern Optics Institute, * Physics Department, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract A new one step method to implement a volume holographic array illuminator with low aberrations using a photorefractive crystal is reported for the first time. According to

the recording and reconstructing wavelengths, we calculated the optimal recording angles and reconstructing angles for the compensation of aberrations which are due to the difference of the wavelengths.

Key words aberration, array illuminator, volume hologram, photorefractive crystal



力科光电有限公司向您致谢

力科公司自 1992 年创办以来,受到光学界的关怀而不断发展,为答谢广大客户,力科公司将以最好的品质和服务,为国内外用户效劳。

- 1 非线性晶体: KTP, DKDP, KDP, LI, LBO, BBO;
- 2 激光晶体: Nd : YAG, Cr : Mg₂SiO₄, Ti : Al₂O₃;
- 3 光学材料: CaF₂, BaF₂, MgF₂ 等。
- 4 二维光学调整架,晶体抛光,镀膜服务

力科光电有限公司
济南七里河路 32 号

电 话: 0531-8931365
传 真: 0531-8940794
6960227

联系人: 祁建平

邮 码: 250100