

文章编号 1004-924X(2011)09-2050-07

基于相机阵列获取元素图像的 集成成像抗串扰参数设计

袁小聪*, 徐于萍, 杨 勇, 赵 星, 步 敬

(南开大学 现代光学研究所 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 为了得到理想的抗串扰三维图像, 研究了用相机阵列记录三维场景时, 如何排列所获取的元素图像并使其与重构的微透镜阵列匹配的问题。通过分析集成成像原理, 讨论了元素图像间距、微透镜阵列间距、焦距等几个重要参数之间的关系, 证明了对于固定的微透镜阵列, 元素图像间距是场景重构时的重要因素, 并结合分析给出了最佳设计参数。系统分析了元素图像阵列放置在焦面或焦面以外的物像关系, 以及元素图像间距的作用, 针对上述因素对成像串扰及景深的影响, 论证了在焦面成像时串扰最小, 景深最大的结论。所证明的结论对用相机获取大场景时排列所获元素图像, 实现三维再现具有指导意义。

关键词: 集成成像; 元素图像间距; 微透镜阵列间距; 场景重构

中图分类号: O435; TB811.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2050

Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging

YUAN Xiao-cong*, XU Yu-ping, YANG Yong, ZHAO Xing, BU Jing

(Key Laboratory of Optical Information Science and Technology of the Ministry of Education of China, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

* Corresponding author, E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn

Abstract: To obtain ideal 3D dimensional displays with crosstalk reduction, this paper researches how to arrange the elemental image and to match it with the reconstructed micro-lens array when a three dimensional scene is recorded by a camera array. The principle of integral imaging is analyzed and design parameters such as the pitch of elemental image, pitch and the focal length of the micro-lens array are studied. On the basis of the analysis, the optimum design parameters are given. Two conditions are discussed respectively when the elemental images are placed within and beyond the focal point of the micro-lenses. When the elemental images are placed at the focal plane, a virtual and real reconstructed image can be obtained simultaneously. The imaging quality is compared in above conditions. It is noted that the less crosstalk and larger depth of the focus can be seen while the elemental images are placed at the focal plane. The conclusion can provide a direction for arranging images and 3D re-

收稿日期: 2011-03-03; 修订日期: 2011-03-18.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB327702)

construction when the camera is used to capture a larger scene.

Key words: integral imaging; pitch of elemental image; pitch of microlens array; reconstruction

1 引言

近年来,三维显示一直是人们关注的热点问题。为人们所知的三维显示有以下几种方法^[1-3]:全息立体显示、视差立体显示、集成成像立体显示等,其中,全息立体显示可以实现真正的三维信息重现,但是由于其光学条件苛刻,不能普及应用。对于视差立体显示,通常是借助于特殊眼镜,如红绿眼镜,偏振眼镜等,使不同的画面分别进入左右眼,再经人的大脑综合产生三维效果,这种显示方法容易产生视觉疲劳。虽然其中之一的柱面镜视差法可以实现裸眼观察,但是由于视角不连续易导致图像画面跳跃。而集成成像,既可以实现三维信息重构,又可以产生连续的视角,并且不需要借助特殊的工具,裸眼即可观察到三维信息,是实现三维显示的重要途径。

集成成像^[4]是由 LIPPMANN 于 1908 年提出的。目前,关于集成成像研究很受关注,文献^[5-6]综述了近年来关于集成成像的重要研究,包括元素图像的获取^[7-9],中继数据处理过程^[10-11]以及元素图像重构^[12-13]等。在众多的参考文献中,常用的实验系统为:用微透镜阵列记录三维场景,然后再用同参数的微透镜阵列重现三维场景。对于较大的三维场景,由于涵盖的信息多,而且场景的深度较大,单个微透镜所能记录的像素点非常有限,而且相互之间会串扰,这样记录下来的模糊的元素图像再用于重构,得到的重构图像分辨率更低,所以,用微透镜阵列来记录大场景的三维信息是不可取的。而采用相机阵列代替微透镜阵列获取场景的三维信息,不仅可以使获取的元素图像分辨率高,而且相互间独立无串扰。但是用微透镜阵列获取元素图像并再现图像,在接收面上形成的元素图像排列由于光路可逆,可以恢复到最初记录时的场景。这种情况下,元素图像之间的排列是光路系统自然形成的,与重构的微透镜阵列相互匹配,不需要再进行人工的改动。而用相机阵列记录三维场景,需要考虑对所获取的元素图像的排列方法并使其与重构的微透镜阵列匹

配以实现三维重现。文献^[14]提出用 3dsMAX 软件中的模拟相机阵列获取元素图像,并用非涅尔微透镜(焦距为 100 mm)进行重现,但没有给出重构的图像,也没有系统地讨论获取的元素图像的排列问题。本文就元素图像的间距,微透镜阵列的间距,以及成像关系进行了理论分析,结合分析,设计了最佳的参数,即在微透镜阵列的前焦面成像,此时重构的图像串扰最小,且景深最大。

2 集成成像原理和参数的分析

集成成像可以分为两部分,第一部分为三维信息的记录,即获取元素图像,此时的微透镜阵列相当于摄影物镜;第二部分为三维信息的重现,即集成元素图像,此时的微透镜阵列相当于投影物镜。集成成像原理如图 1 所示,在图像获取过程中,微透镜阵列作为摄影物镜,物镜的参数都是一致的,包括孔径和焦距,因此,其所构成的元素图像的相对位置是一样的。由成像关系可知,对于三维场景,只有一个物平面才与接收器平面 L_1 成共轭关系,其它不在该物平面的点如 A' ,都将在像面成一个弥散斑。在集成重构过程中,微透镜阵列作为投影物镜,根据光路可逆,与接收器平面共轭的物面可以完全重构,而原来是弥散斑,将在重构时放大成更大的斑。选择该物面作为研究对象,使其能够在最后的重构过程中完全理想成像,其它不在这个参考面的点就会在这个理想重构面的附近形成弥散斑。因此,只需具体考虑该参考物面的成像关系。以 AB 为参考面,作为三维场景中的一个平面,该平面的固定点经过每个微透镜所成的像在接收面间距相等,定义元素图像的间距为同名点的间距,其光路图如图 2 所示。

在图 2 中, y' 为元素图像的大小, y 为重现场景的大小,其中 y, y' 倒立为负,正立为正。 p' 为元素图像的间距, p 为微透镜阵列的间距, g 为重现时的物距, l 为像距,其中 g 在重构微透镜阵列左边为正,在右边为负。从几何光学分析可以得到以下关系:

第一部分:图像获取。可以看到,对于同一个

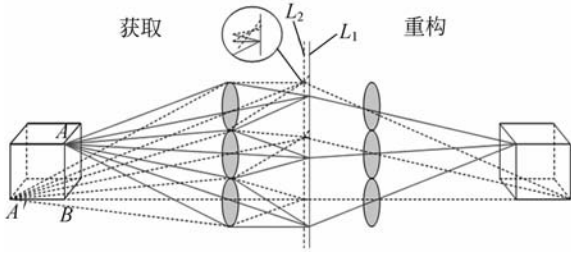


图 1 集成成像原理图

Fig. 1 System of integral imaging

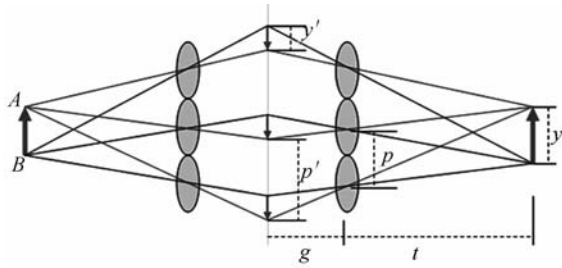


图 2 元素图像的获取与重构

Fig. 2 Record and reconstruction of elemental images

平面场景,经过每个微透镜所成的像大小相等,间距相同。

第二部分:图像重构。可以得到以下关系:
成像公式:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

横向放大率:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{l}{g}, \quad (2)$$

由式(1)、(2)得到:

$$l = f - f \frac{y'}{y}, \quad (3)$$

元素图像间距与微透镜间距比:

$$\frac{p'}{p} = \frac{l+g}{l} = 1 + \frac{g}{l}, \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),可以得到:

$$y = \frac{y' p}{p - p'}, \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),可以得到像距

$$l = f \frac{p'}{(p' - p)}, \quad (6)$$

同理得到物距

$$g = f p' / p. \quad (7)$$

对于常用的系统,由于拍摄的场景较大,一般都用相机阵列或者软件模拟的方法获得元素图

像,因此,只考虑元素图像重构这一部分。

情况一:元素图像阵列不在焦面上,即 $g \neq f$ 。由公式(5),(6),(7)可以看出,重构图像的成像位置 l 及成像大小 y 都与微透镜阵列间距和元素图像间距有关。

由公式(6)(7)可以得到:若要成实像,则要求像距 $l > 0$,即 $p' > p$,此时物距 $g > f$ 。同理,若要成虚像,要求像距 $l < 0$,即 $p' < p$,此时物距 $g < f$ 。

在单透镜成像系统的成像关系为:正立的物体,物距在一倍焦距以外时,将成倒立实像,物距在一倍焦距以内,将成正立虚像。若要观察到正立的实像,只需要将物体倒置一下。因此,改变物体与透镜之间的关系,就可以找到两个成像位置,一个成实像,一个成虚像。而集成成像系统虽然也有对应的物像关系,但是却还有一个制约因素,即对于固定的微透镜阵列,若元素图像阵列的排列间距 p' 是固定的,其物距也是一个确定值,如公式(7)所示,即元素图像阵列的排列决定了重构图像的虚实。这一点说明,微透镜阵列成像不会像单透镜成像系统那样找到两个物像关系。固定的元素图像阵列,对应唯一理想成像位置,在该位置可以成最清晰的像。重构的图像不是实像,就是虚像,不可能同时获得。

情况二:元素图像阵列放在前焦面上,即 $g = f$ 。由公式(7)可以得到,元素图像的间距等于微透镜阵列的间距,即 $p' = p$,元素图像的大小也与微透镜大小一致。此时,人眼所观察到的重构图像是由视差所引起的,由于元素图像的点空间深

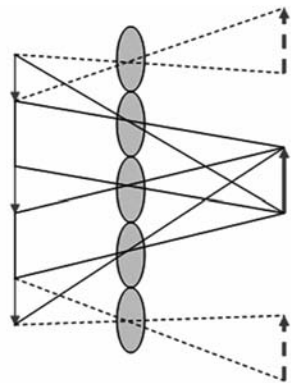


图 3 元素图像间距与微透镜间距不一致时的串扰

Fig. 3 Crosstalk between microlenses while the pitch of elemental images isn't equal to the pitch of microlenses

度不一,在理想像面的前后将对应观看到重构图像的凹凸,即虚实^[15]。因此,在焦面上的集成成像可以同时获得实像与虚像。

情况一和情况二,原理上都可以构成集成成像的重构系统,但是,在焦面以外的成像系统,由于元素图像的间距与微透镜的间距不一样,如图3所示,导致成像后每个微透镜间的串扰增多(用虚线表示)。而且,从最后重构的三维图像景深^[16]考虑,元素图像放置在焦面上的成像情况可以获得很大的景深,重构图像的三维效果更好。因此,通常选用的是元素图像放置在焦面上的成像系统。

3 实验模拟与分析

3dsMAX 软件是一款用于三维动画场景制作的软件。利用其相机阵列功能,对图4所示的场景进行拍摄,获得的元素图像如图6所示。在拍摄元素图像的过程中,可以用虚拟相机定标拍摄的范围,这样,每一个元素图像的成像范围都是一致的。在拍摄的场景中,物体只是一部分,如图中的两个苹果,其他空白处可以认为是该场景的背景,因此可将固定范围的场景分为一层的物平面。将用相机阵列拍摄得到的元素图像,对应图2中用微透镜阵列获取的元素图像,只要使元素图像大小等于元素图像间距 $y' = p'$,元素图像就可以按相机阵列拍摄顺序简单的无间隙的排列连接,即获得用于虚像显示的元素图像集,称为虚像元素图像集;若将每个元素图像进行 180° 的翻转,再按顺序排列,即获得用于实像显示的元素图像集,称为实像元素图像集。本文在 3dsMAX 软件中模拟了一个 40×40 的微透镜阵列,其曲率半径为 1 mm,方形孔径,边长为 1 mm,折射率为 1.5,微透镜冠 d 高为 0.3 mm, l_f 表示焦面到微透镜平面的距离,如图5所示,其焦距 $f = 2$ mm, $l_f = f - \frac{d}{n} = 1.8$ mm。由于模拟的微透镜存在球差,在最小球差处 $l_f = 1.75$ mm。将元素图像集放置在微透镜阵列相应的位置,获得重构的图像,并用虚拟相机进行拍摄。整个成像过程中,微透镜阵列的位置和大小均未改变,虚拟相机的位置也是固定的。

根据第二部分的理论分析,分别对两种情况

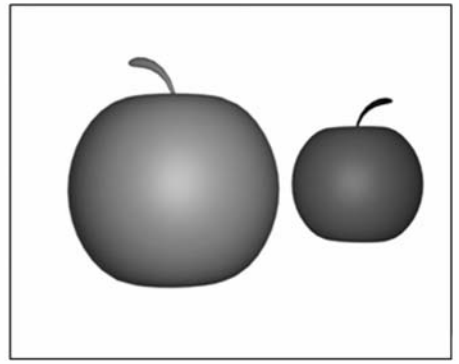


图4 模拟的拍摄场景-苹果

Fig. 4 Shooting scene-two apples in the simulation

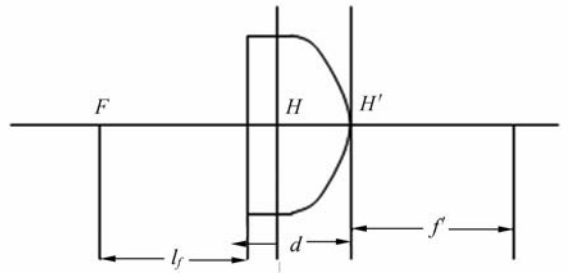


图5 微透镜模型

Fig. 5 Model of microlens

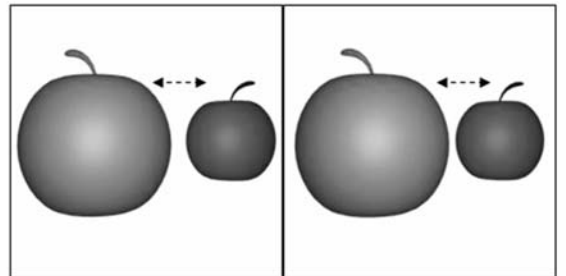


图6 记录了场景不同信息的元素图像

Fig. 6 Elemental images recording different information of scene

进行重构成像模拟:

(1) 元素图像放置在前焦面上。其相关参数为: $y' = p' = p = 1$ mm。得到的重构图像如图7(a)。

(2) 元素图像放置在焦面以外。若要求 $y = 10y'$, 则成实像的参数为: $p'/p = 10/9$, $g_{\text{Real}} = l_f \times p'/p = 1.944$ mm, 得到的重构图像如图7(b); 成虚像参数为: $p'/p = 10/11$, $g_{\text{Virtual}} = l_f \times p'/p = 1.591$ mm, 得到的重构图如图7(c)。

若要求 $y=20y'$, 则成实像的参数为 $p'/p=20/19$, $g_{\text{Virtual}}=1.78$ mm, 得到的重构图像如图 7(d); 成虚像参数为: $p'/p=20/21$, $g_{\text{Virtual}}=1.67$ mm, 重构图像如图 7(e)。

由图 7 可以看出, (a) 较其他情况下重构的图像串扰更少, 更清晰, 三维效果更好。从 (b), (d) 中对比可以看出, 重构时的物距越靠近焦距位置, 显示的图越清晰。实像 (b), (d) 较虚像 (c), (e) 的

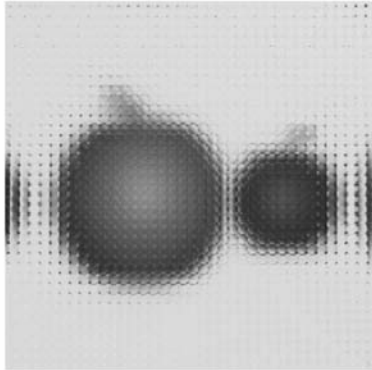
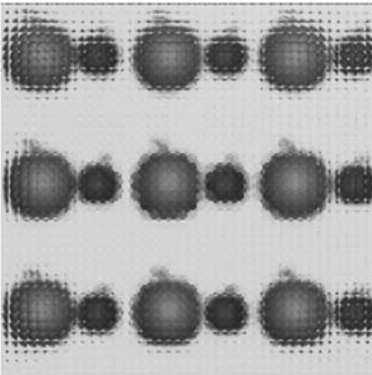
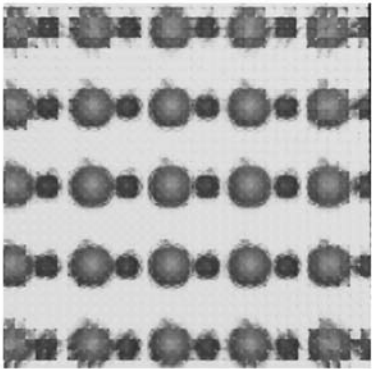
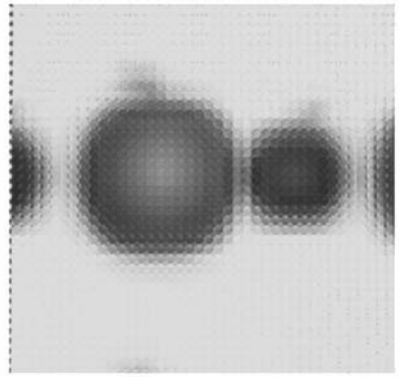
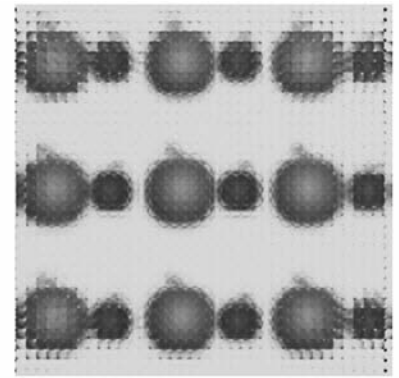
(a) $g=1.75$ mm(b) $g=1.944$ mm(c) $g=1.591$ mm(d) $g=1.78$ mm(e) $g=1.67$ mm

图 7 元素图像放置在不同位置时的重构图像

Fig. 7 Reconstructed images at different locations of elemental image array

串扰少, 其原因在于成虚像时, 其像面在微透镜阵列里面, 离虚拟相机更远, 相机的视角更广, 可以拍到所有的串扰图像。

4 结 论

本文通过对集成成像原理的分析, 证明了在固定的微透镜阵列成像系统中, 对三维信息重构最重要的是元素图像之间的间距。分析了元素图像阵列放置在焦面与不在焦面的成像情况, 考虑重构图像的景深以及串扰问题, 证明了当元素图像阵列放在焦面上成像, 获得的重构图像三维效果最好, 串扰最少。借助 3dsMAX 软件的虚拟相机, 以及模拟的微透镜参数, 对元素图像集进行重现。结果显示, 对于唯一的元素图像排列, 将实现唯一的重构图像, 并不能找到其他的清晰成像位

置。而在不同元素图像排列中,经过模拟实验的对比,当元素图像之间的间距等于微透镜之间的间距时,元素图像集放置的位置是确定的,即放置在前焦面上,所得到的像是最清晰的。而不在焦面处情况下的重构图像,越靠近焦面位置,其重构

图像效果越好。本文所证明的理论对用相机阵列获取大场景时,排列所获得的元素图像实现三维再现具有指导性意义,而相机阵列所获取的元素图像的视场角,分辨率,与重构微透镜参数的匹配问题,将是以后的重点研究内容。

参考文献:

- [1] 孔令胜,南敬实,荀显超. 平面三维显示技术的研究现状[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 112-118.
KONG L SH, NAN J SH, XUN X CH. Research status quo of flat 3-D display technology[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 112-118. (in Chinese)
- [2] FRAUEL Y, JAVIDI B. Comparison of passive ranging integral imaging and active imaging digital holography for three-dimensional object recognition [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(2): 452-462.
- [3] STREN A, JAVIDI B. Three-dimensional image sensing, visualization, and processing using integral imaging[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(3): 591-607.
- [4] LIPPMANN G. La photographie integrale[J]. *C. R. Acad. Sci.*, 1908, 146: 446-451.
- [5] PARK J H, HONG K, LEE B. Recent progress in there-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(34): H77-H94.
- [6] MANUEL M C, JAVIDI B. Progress in 3-D multi-perspective display by integral imaging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1067-1077.
- [7] HAIN M, JAVIDI B, *et al.*. 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(1): 315-326.
- [8] LEE B, MIN S W, JAVIDI B. Theoretical analysis for three-dimensional integral imaging systems with double devices [J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(23): 4856-4865.
- [9] WANG Q H, DENG H, JIAO T T, *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 512-514.
- [10] CHOAND M, JAVIDI B. Computational reconstruction of there-dimensional integral imaging rearrangement of elemental image pixels [J]. *J. Display Technol.*, 2009, 5(2): 61-65.
- [11] 张健, 辛悦, 刘伟奇, 等. 基于微透镜阵列的三维数字成像[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1702-1706.
ZHANG J, XIN Y, LIU W Q, *et al.*. Three-dimensional digital imaging based on microlens array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1702-1706. (in Chinese)
- [12] JANG J S, JAVIDI B. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(5): 324-326.
- [13] MANUEL M C, JAVIDI B. Integral imaging with improved depth of field by use of amplitude-modulated microlens arrays[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(31): 5806-5813.
- [14] 焦甜甜, 王琼华, 等. 基于 3DSMAX 的集成成像研究[J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 621-624.
JIAO T T, WANG Q H, *et al.*. Computer-generated integral imaging based on 3DS MAX[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(5): 621-624 (in Chinese)
- [15] SON J Y, KIMA S H, JAVIDI B. Image-forming principle of integral photography[J]. *J. Display Technol.*, 2008, 4(3): 324-331.
- [16] JANG J S, JIN F. Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(16): 1421-1423.

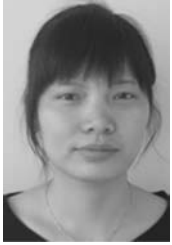
作者简介:



袁小聪(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事微光学、光学显微成像与传感、光镊等方面的研究。E-mail: xcyuan@nankai.edu.cn



赵星(1980—),男,博士,讲师,主要从事光学信息处理以及光学系统设计等领域的研究工作,目前从事新型三维成像与显示技术的相关研究。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn



徐于萍(1987—),女,硕士研究生,主要从事三维显示方面的研究。E-mail: annyxyuy_013@163.com



步敬(1964—),女,硕士,实验师,主要从事光学微细加工以及微光学元件应用的研究。E-mail: jingbu@nankai.edu.cn



杨勇(1972—),男,副教授,主要从事机器视觉、三维成像与显示等方面的研究。E-mail: yangyong@nankai.edu.cn

● 下期预告

可激发等离子体表面波的离子交换单模条波导

刘瑾^{1,2}, 陈抱雪¹, 杨海马¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
2. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

为激发等离子体表面波,设计并制备了离子交换单模条波导。对波导设计过程中相关参数的实验确定方法、条波导制备过程涉及的二维扩散问题,折射率分布以及等离子体表面波的激发等进行了研究。基于 $\text{Ag}^+ - \text{Na}^+$ 离子交换技术在德国 B270 光学玻璃上制备出渐变型平面波导,采用余误差函数拟合其折射率分布,得到一定工艺参数下的光波导扩散系数 D_{eff} 与折射率增量值 Δn 。在此基础上,利用等效折射率法给出单模波导条件,设计相应的工艺参数,以光刻技术为核心在 0.1% $\text{AgNO}_3 - 99.9\%$ NaNO_3 混合熔融盐中实验制备了单模条波导,并进行模场分布测试,结果表明制备的单模条波导具有良好的单模特性,在此波导上镀 50 nm 的金膜,采用 40%~70% 的甘油溶液进行测试,实现了等离子体表面波的激发。