

微小光学的研究现状

刘 德 森

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

叙述了微小光学的新进展,对微小光学基本原理给出了简单概括,并对发展动态进行了评论。在微小光学理论方面,讨论了“阵列光学”理论,研究了光学阵列的物与共轭象间的关系;在微小光学器件方面,讨论了变折射率透镜、平面微透镜列阵、衍射光学元件和三维集成光学系统;在应用方面,讨论了和并行光通信、光计算有关的一些新应用。

关键词: 微小光学,自聚焦透镜,平面微透镜列阵

Abstract

This paper presents a review of the recent progress in microoptics. A brief summary of microoptics principles is given, followed by a state of the arts review. We divide this field into three parts: theory, devices and application. In the theoretical aspect, we shall discuss the theory of "array optics", and study the relationships between an object and its conjugate images in an optical array. As for microoptic devices, we will describe the gradient index lens, planar microlens array, diffractive optical elements and three-dimensional integrated optical system. Finally we shall illustrate new applications related to the parallel optical communication and optical computing.

Key word microoptic, gradient index lens, planar microlens array

微小光学是研究微米、亚微米级尺寸的光学元件(包括光源、光纤、波导和折射、反射、衍射光学元件等)的微加工技术及利用该元件以实现光束的发射、聚焦、传输、成像、分光、图像处理、光计算等系列功能的理论和技术的学科,是现代光学的分支,是光学与微电子、微机械互相融合、渗透、交叉而形成的前沿学科^[1,2]。

微小光学研究对象主要包括两大类:基于光的反射、折射原理制作的光学元件,主要是微透镜及列阵;基于光的衍射原理制作的光学元件,主要是衍射光学元件。

从历史发展来看,随着产品体积缩小、重量减轻,可靠性提高,速度变快,功能多样,成本下降,逐步形成了一门以研究、设计、制作微米级装置和系统为主要内容的新技术,称为“微工程”。微工程在电子学领域是“微电子学”,在

机械领域是“微机械学”,在光学领域叫“微小光学”。“微小光学”(microoptics)一词是日本电气公司内田祯二教授1981年提出来的^[3]。1983年,日本出版了《微小光学新闻》,当时,微小光学主要指自聚焦透镜和微型普通透镜。以后,微小光学有很大发展,既包括微型化、轻量化的分立元件,又包括稳定性好、不需调整、易于批量生产的阵列光学元件。自1987年日本发起召开第一届微小光学国际学术会议以来,目前已召开了四届国际学术会议,这说明微小光学有很大发展,作为一个新学科领域已经形成。另外,光学仪器的微型化和微小光学系统的开发,特别是随光信息处理和光计算技术的发展而发展起来的微透镜阵列器件的应用,迫切要求光学元件微型化、阵列化和集成化。微小光学的发展,还使光学元件的尺寸进入微米级领

域,使人的认识进一步深入,使传统光学及其技术发生巨大变革,这对光学领域特别是信息领域的发展将产生难以估量的作用。

一、自聚焦透镜的发展与微小光学的出现

通常,我们把具有折射率分布的光学材料称为变折射率 (gradient index, GRIN) 材料。1969年,日本北野一郎^[3]等首先采用离子交换工艺制成变折射率透镜,称为自聚焦透镜 (selfoc)。此后,人们对该领域的理论、工艺、设计、应用和器件都作了深入研究,逐步形成变折射率光学 (gradient index optics)。

常见的变折射率分布有三类^[4]: 即折射率分布对某点呈球对称的球向折射率分布; 折射率分布对表面平行的某一平面呈面对称的轴向折射率分布; 折射率分布对中心轴对称的径向折射率分布。折射率分布可写成一般形式:

$$n(r, z) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots + r^2[n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2 + \dots] + r^4[n_{20} + n_{21}z + n_{22}z^2 + \dots] + \dots + r^{2p}[n_{p0} + n_{p1}z + n_{p2}z^2 + \dots], \quad (1)$$

这里, z 是沿光轴的坐标, r 为径向坐标。当忽略所有含 r 的项时, (1) 式变成

$$n(0, z) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots, \quad (2)$$

即轴向折射率分布 (axial grin profile)。当忽略包含 z 的项时, (1) 式变成

$$n(r, 0) = n_{00} + n_{10}r^2 + n_{20}r^4 + \dots + n_{p0}r^{2p} + \dots, \quad (3)$$

即径向折射率分布 (radial grin profile)。 (3) 式通常可写为

$$n^2(r) = n^2(0)[1 - (gr)^2 + h_4(gr)^4 + h_6(gr)^6 + \dots], \quad (4)$$

这里, g 是聚焦常数, h_i 是第 i 阶折射率分布系数。近来,不少学者^[4,5]对自聚焦透镜的光线轨迹、成像特性和像差作了较深入研究。

在材料中形成变折射率分布的基本方法是采用离子交换工艺^[5]。它是利用玻璃和熔盐中

极性离子间的热扩散交换,而在玻璃中形成极性离子的浓度梯度,从而形成折射率梯度。折射率分布主要与三个因素有关,即边界条件、扩散系数、交换温度和时间。理论和实验证明,外加电场可以促进离子的扩散交换,缩短交换时间,而且还可能控制折射率分布,这是发展很快的一种改进离子交换方法。此外,离子填充法、溶胶-凝胶法、气相沉积法、晶体生长法、中子辐照法、热扩散共聚和光敏共聚法也是制作变折射率透镜的方法^[5]。

由于变折射率透镜具有直径小(可小于 0.1 mm)、重量轻(可小于 50 μ g)、焦距短(可位于端面上)、数值孔径大(可大于 0.6)、消像差性能好、端面可为平面、光学特性与透镜长度有关等特点,是一类和传统透镜不同的、极重要的新型透镜和微小光学元件。它的出现是传统光学的重大发展,为微小光学的产生和发展奠定了基础。这类透镜在光纤通信、光纤传感、光学仪器、信息处理、医疗仪器和办公自动化方面有广泛应用^[5]。

二、列阵器件的出现标志着微小光学发展的新阶段

微小光学迅猛发展的一个重要标志是列阵光学元器件的出现。随着科学技术的发展,光学元器件的微型化,势必使分立元器件向阵列元器件发展,迫切要发挥光子作为信息载体所具有的高速度、并行性和巨大的互连能力,就必须发展二维和三维光电子和光子元器件阵列。因而,微小光学阵列就迅速发展起来。微小光学阵列器件的发展在很大程度上依赖于微加工技术的发展。目前,具有代表性的是利用变折射率工艺制作的自聚焦平面微透镜阵列 (gradient index planar microlens array)。

变折射率工艺是将平面光刻工艺和变折射率离子交换工艺相结合而发展起来的一种制作微透镜阵列的工艺——光刻离子交换工艺。1981年,日本 K. Iga^[6]用该工艺制作自聚焦平面微透镜阵列。由于该器件同时具有微型、集

成和变折射率三个特点,因而体现了集成光学、微小光学和变折射率光学多学科交叉的特点。光刻离子交换工艺的主要点是:在特定玻璃基片上首先溅射一层掩膜,再通过掩膜刻蚀工艺将图形转移到掩膜上(图形为正片或负片),于是在玻璃基片上形成规则排列的透光的圆形窗口,或在透明背景下形成规则排列的不透光圆盘。通过离子交换工艺,就可制出均匀分布的自聚焦平面微透镜列阵。图1为我们制作的样品的成像照片和端面照片。

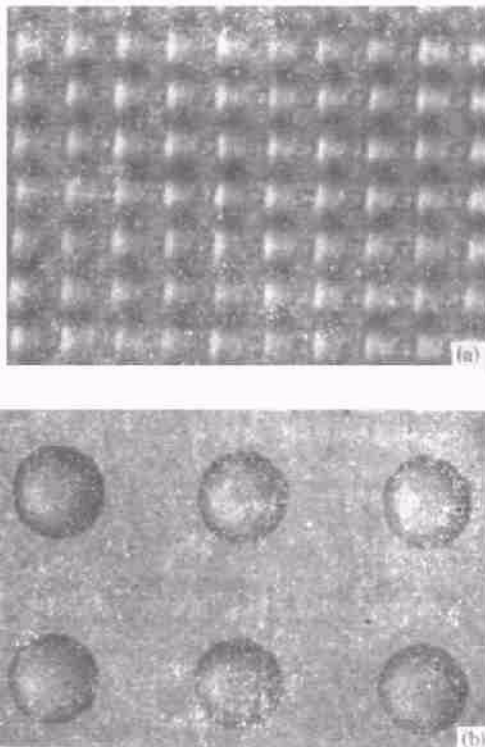


图1 (a) 自聚焦平面微透镜列阵成像照片;
(b) 自聚焦平面微透镜列阵端面照片

由于有两种不同的掩膜工艺,因而就有两种不同的离子交换工艺^[7,8]。一种是开孔工艺(window mask),即掩膜为开孔列阵,经离子交换后,在小孔区形成近似球对称折射率分布。求解扩散方程,得到折射率分布是

$$\frac{n(y, z, t) - n_0}{n_1 - n_0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda r}{\lambda_0} (\lambda r) \cdot \left\{ e^{-\lambda z} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) + \lambda \sqrt{Dt} \right] - e^{-\lambda z} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} + \lambda \sqrt{Dt} \right) \right] \right\} d\lambda. \quad (5)$$

另一种掩盘工艺(disc mask),在盘的周围进行离子交换,求解扩散方程,得到折射率分布为

$$\frac{n(y, z, t) - n_0}{n_1 - n_0} = \frac{1}{\pi^{3/2}} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{I_0(\lambda r)}{\lambda^2 I_0(\lambda a)} + \frac{2}{a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_m r)}{(\alpha_m^2 + \lambda^2) J_1(\alpha_m a)} \right\} \lambda \cdot \int_0^{\sqrt{Dt}} \exp(-r^2) d\tau - \frac{\sqrt{Dt}}{a} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_m r)}{\alpha_m J_1(\alpha_m a)} \cdot \exp(-D\alpha_m^2 t) \cdot \int_0^r \frac{\exp[(\alpha_m^2 + \lambda^2)\tau]}{\sqrt{\tau}} d\tau \cdot \cos \lambda z \exp(-\lambda^2 Dt) d\lambda \quad (6)$$

这里, n_0 为基片折射率, n_1 为离子交换开始后基片表面折射率, D 为扩散系数, erfc 为余误差函数, a 为开孔半径, I_0 为零阶虚宗量贝塞尔函数, α_m 为零阶贝塞尔函数 $J_0(\alpha_m a) = 0$ 的第 m 个根。从上述折射率分布出发,可以得到光线在单透镜中的轨迹方程

$$r = r_0 \cos [2F(z_m) - F(z)] + \frac{P_0}{gn_0} \sin [2F(z_m) - F(z)], \quad (7)$$

其成像矩阵是

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} \cos [2F(z_m) - F(z)] & \frac{1}{n_0 g} \sin [2F(z_m) - F(z)] \\ -F(z) & -F(z) \\ n_0 g \sin [2F(z_m) - F(z)] & -\cos [2F(z_m) - F(z)] \\ -F(z) & -F(z) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

这里, z_m 为拐点, $F(z_m) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P_0}{n_0 r_0 g} \right)$,

$F(z) = \frac{1}{\sqrt{|v_{20}|}} \sin^{-1} \frac{n_0 \sqrt{|v_{20}|} g z}{\lambda_0}$, r_0 为入射点离轴距离, P_0 为入射点光线的斜率, v_{20} 为

折射率分布矩阵元。利用(8)式,很容易得到焦距、主平面、物像关系等一系列光学量。

实验证明^[9],窗口大小对折射率分布影响很大。为了得到理想的球形折射率分布,窗口应当很小,当交换深度大于窗口半径时,等折射率线是以 $\sqrt{r^2+z^2}$ 为半径的球。这样制作的平面微透镜列阵,窗口表面凸起^[9]。因此,每个微透镜就相当于一个厚度为凸起高度、直径等于窗口大小的平凸透镜和一个球向变折射率半球透镜的组合。根据玻璃结构物理化学分析,在离子交换过程中,由于熔盐中的 Tl^+ 离子取代了玻璃中的 Na^+ 离子,引起窗口处玻璃体积膨胀,密度变小。在离子间引力和表面张力共同作用下,凸起部分表面积将趋于最小,成为球面,这对成像特性影响很大。

近来,我们采用两阶段离子交换工艺制作了球形自聚焦平面微透镜列阵^[10],还制作了直径为 $10\mu m$ 的高密度自聚焦平面微透镜列阵^[11]。由于自聚焦平面微透镜列阵具有一般透镜的准直、聚焦、成像功能,而且直径很小,因而在信息领域有重要应用。

制作微透镜列阵的方法还有经典法、热流工艺、光敏法、化学气相沉积工艺、溶胶-凝胶工艺和激光增密工艺等。

三、飞速发展中的衍射光学元件

衍射光学元件(diffractive optical elements)是近几年才发展起来的一类重要的微小光学元件。它是基于衍射原理而发展起来的微小光学一个新分支,是光学与微电子交叉形成的前沿课题。与传统光学元件比较,衍射光学元件有如下特点:

(1) 理论基础是光的衍射。衍射光学元件是同轴、纯位相型光学元件,有极高的衍射效率,不仅能产生任何形式的光波波前,而且还能对光学波前进行变换与校正。

(2) 采用微电子工艺制作。

(3) 通过选择台阶陡度和间距,使元件有很好的消球差和色差的能力。

(4) 容易实现微型化、阵列化、集成化和多功能化。

制作衍射光学元件所采用的微加工工艺主要有^[12]:激光束刻写、显微光刻、全息摄影记录、激光微加工技术和薄膜沉积技术等。制作工艺必须解决的技术难题是:不同掩膜间图形不应重叠;刻蚀只在垂直方向进行,没有横向刻蚀,掩膜边缘不应侵蚀;精确控制位相级的高度和大小,通常应优于百分之一。

另一类衍射光学元件是微菲涅尔透镜(micro fresnel lens)^[13],它在光通信和光信息处理系统中有重要应用。这是因为它体积小、重量轻、衍射效率高,并且衍射极限和聚焦特性好。微菲涅尔透镜常采用电子束光刻技术制作,为了提高性能,还提出了激光束光刻工艺(laser beam lithographic technique)。

由于衍射光学元件不仅体积小、重量轻、成本低、易于大量复制,而且可实现多功能化,因而有广泛应用。

四、平面波导工艺的发展

我们感兴趣的一个重要发展是基于光刻离子交换技术制作的掩埋式、聚焦型玻璃光波导^[14]。最近,报道了一种低损耗 1×4 和 1×8 分支波导,由于基片折射率和光纤几乎一样,因而可大大降低耦合损耗。

M. Kawachi^[15]提出了在Si基片上通过火焰水解沉积(flame hydrolysis deposition)工艺制作平面光波导的方法。利用它还制作了具有多功能(如分波、合波、波分复用)的Mach-Zehnder干涉仪和 8×8 热光开关阵列。采用界面凝胶共聚工艺(interfacial copolymerization technique)^[16],在聚合物材料上制作二维和三维光波导和自聚焦透镜列阵,有很大应用价值和很好发展前景。

五、阵列光学理论有重大发展

光学元件阵列虽早已提出,但其光学特性

研究却是近几年的事。二维光学器件列阵的一个重要问题是研究光信息在器件列阵中和二列阵间的传输、变换、分支、成像和耦合等特性,这一研究领域通常称为“阵列光学”(array optics)^[2,17]。由于光学元件列阵是由规则排列的许多同样单元光学元件组成,因此,就单个光学元件来说,其光学特性完全一样,但就列阵整体而言,又有其独特的性能,其特性比较见表1。

表1 列阵器件和分立器件特性比较

项目	分立光学元件	列阵光学元件
并行性	成像并行性	单元成像并行性,单元间内禀并行性
线性	线性不变性	单元线性不变性;整体没有线性不变性
空间不变性	空间不变性	单元空间平移不变性,整体空间维数可以变化
独立性	独立性	单元有独立性,整体可以相关、交叉

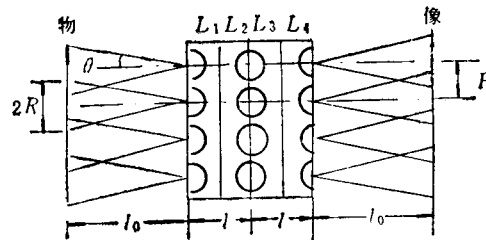
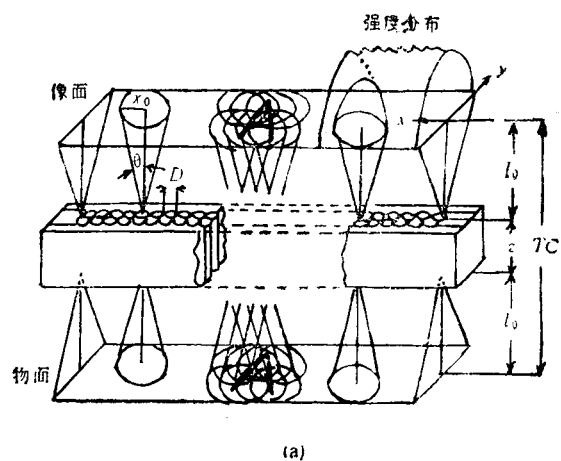
我们还研究了列阵器件的近轴光学特性,得到了重要的物像关系和其他光学特性。

光学元件列阵还可以综合成像^[18]。综合成像就是一个二维图像经过光学元件列阵后,由各单元光学元件传递的图像交叉重叠而形成的一个二维像。这是光学列阵器件一个极重要的特性。对一般由相同光学元件组成的列阵,只有按一定规律排列时,而且仅在一对固定的共轭面上才存在综合像。该面的位置和放大率由列阵的排列和单元光学元件的传输矩阵决定,并和单元光学元件相同。图2为综合成像实例。

六、三维集成光学器件受到特别重视

三维集成光学思想的提出和三维集成光学器件的出现是微小光学具有创新意义的重大发展^[4]。集成的一般目的是增加器件的稳定性和密集性。集成光学是本世纪60年代后期提出来的,它主要指在基片上沉积薄膜介质以构成光波导,利用它可以构成各种功能的光器件,如激光器、探测器、调制器、透镜、耦合器、偏折器等,再把这些不同功能的器件沉积在同一基片上,

物理



(b)

图2 综合成像原理图

- (a) 自聚焦透镜列阵 (l_0 —物距, T_c —共轭长度, l —自聚焦透镜长度, D —自聚焦透镜直径);
 (b) 自聚焦平面微透镜列阵。

构成单片集成的光学系统,集成光学的出现是光学领域的重大进展。但是按这个思想制作的集成光路,只能处理一维空间光信息,而且工艺上也有难以克服的困难。另外,在人工视觉、神经网络、光并行逻辑、信息处理中,所遇到的都是二维空间信息,就必须采用三维集成光学器件。

三维集成光学思想最早由 K. Iga^[19] 提出。他指出,在一种材料基片上只制作一种功能的

光学元件列阵，然后把不同功能的二维光学元件列阵纵向叠合起来，从而实现多功能集成，他把它称为叠合平面光学 (stacked planar optics)^[19,20]。其特点是：可用平面工艺批量生产；可用光学方法对元件或光路进行合理排列；由不同材料的光学元件层再利用光波导纵向连接；易与光纤耦合。

1985年，Y. KokuBun^[21]针对不同功能的光学元件难以制作在同一基片上的事实，提出了一个基片只制作一种功能元件，再用波导使

二基片间连接的三维集成光学的设想。上海交通大学的陈益新^[22]在1990年对三维集成光学进行了较深入的讨论，他认为三维集成光路应是一多层结构，每层中都包括各种功能的光或电子的元器件，光束既可以在一层中的各元件中传输，也可在不同层间传输。

1991年，K. H. Brenner^[23]采用新的光刻工艺，制作了一种三维叠合微型光集成系统，如图3所示。他使不同功能的元件位于不同层上，对不同层有不同的要求，要采用不同的工艺制

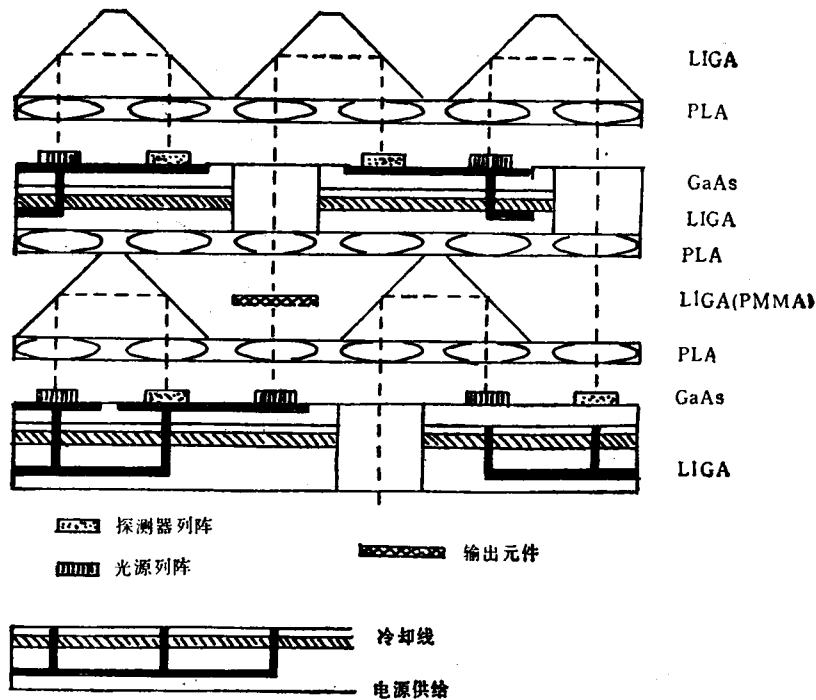


图3 K. H. Brenner 提出的三维集成光学系统^[23]

(LIGA——粒子深刻蚀，PLA——平面微透镜列阵；PMMA——在聚甲基丙烯酸甲酯中的光学元件)

作。如激活器件位于一层，间隔由高能粒子深度光刻的 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯) 保证。透镜和透镜列阵位于另一层，光路由 PMMA 制作，还用 PMMA 制作偏转器件 (deflector)，滤波器作在另一层上，再将这些单层叠合起来，就构成一个三维光电子集成系统。

1992年，K. Imanaka^[24]提出了微小光子器件 (micro photonic devices, MPD)。随着光电子集成回路 (OEIC)、光集成回路 (OIC) 和光子集成回路 (PIC) 的发展，以及微电子与

微机械相结合产生的微加工技术和微型光电子元件的应用，就出现了一种采用混合光集成工艺制作的“微小光子器件”。它包括基本微小器件 (如半导体有源器件、微小无源器件、微型光调制器等)、光-电微小光子器件 (包括微型准直光源器件、微型光子传感器和微位移传感器等) 和光-电-微机械微小光子器件 (包括激光束扫描器和微型扫描传感器等)。

总之，光-电和光-电-微机械的混合集成元件 (即微小光子器件) 的出现，促进了微小光

学的发展。而光、电和微机械的结合是集成光电子器件发展的社会需要。

七、微小光学在光通信中的新应用

自聚焦透镜在光通信中有广泛应用,利用自聚焦透镜制作的无源器件(如连接器、分波器、波分复用器、隔离器、光开关等)和有源器件(如带自聚焦透镜的激光器等)已有商品。利用微透镜列阵可以制作多种无源器件列阵。在光源和探测器列阵中,微透镜列阵可使光束准直、会聚、缩束,大大提高耦合效率。N. Streibl^[25]等利用微透镜列阵制作了照明器列阵。A. W. Lohmann^[26]对各种照明器列阵进行了较深入的研究。我们利用自己研制的平面微透镜列阵制作了光源列阵准直器,它使 8×8 (中心距1mm)发光二极管列阵的发散光输出变成准直或会聚光输出。我们还制作了 8×8 (中心距2mm)光纤耦合器列阵,它可将光源列阵中的光信息高效率地耦合到光纤列阵中去,还可实现高效率的光纤列阵间的耦合。日本的M. Oikawa^[27]研究了利用自聚焦平面微透镜列阵实现四通道发光二极管列阵和光纤列阵间的耦合,耦合损耗为8dB。

八、光计算中的微小光学

众所周知,光计算技术的出现将极大地推动科学技术和国民经济的发展。光计算技术的发展,需要研制一些新的元器件,微小光学正是这样一类元器件。由于它可以提供密集光信息通道,可以充分利用光信息的并行性,因此成为光计算技术一个重要的基础元件。国外不少学者做了大量工作,这里仅列举几个有代表性的实例。

(1) K. Hamanaka^[28]等利用平面微透镜列阵建立了一个多通道成像和多通道傅里叶变换系统,该系统设计有很大灵活性,在矩阵-向量乘法、光学互连、多通道匹配滤波和图像处理中有重要应用。

(2) M. Agu^[29]等利用平面微透镜列阵组成光学神经网络图像识别系统。该系统的特征提取,采取了焦距2.6mm、直径1.05mm的平面微透镜列阵组成的多通道匹配滤波器。

(3) S. Kawai^[30]等制作了垂直腔面发射电子-光子器件(vertical to surface transmission electrophoto devices, VSTEPS)。在该器件基底上容易制作衍射光学元件(DOE),并且很方便地和平面微透镜列阵对准和密集集成,集成器件具有激光器、探测器、放大、开关和存贮功能。

(4) K. Hamanaka^[31]为了实现精密装配、密集安装、耐用性好、信息容量大的自由空间光互连,提出了光学母线互连系统(optical bus interconnection system, OBIS)。该系统采用了串联的平面微透镜列阵,它可以应用到模板-模板间的光学互连。由于系统中可任意插入光学元件或光电子元件(如空间滤波器、棱镜列阵、探测器列阵、微透镜列阵),它还可以在多种情况下使用,如信息并行处理。他还利用这一结构,组成了多层神经网络系统。

(5) 光学图像交叉开关(optical image crossbar switch), M. Fukui^[32]等在以往信息处理系统基础上,采用微透镜列阵、图像逻辑代数语言的光学图像交叉互连网络。该系统具有图像运算操作(Image Cating)、多通道成像(multiple image)和扩展相消(extended erosion)的全并行处理功能,并且有无阻塞和可重构的特点,很适合进行二维图像处理。

微小光学元件还有许多应用,如复印机、传真机、激光打印头的透镜列阵,自聚焦内窥镜、光盘读写头等,这里不再进行讨论。

微小光学是研究微米、亚微米级光学元器件的制作工艺、应用技术、基本理论的新学科,是光学、微电子、微机械的交叉学科,发展很快。总的来看,微小光学的发展趋势是^[2]:

第一步,实现现有光学元器件的微型化、轻量化(分立元器件),使元器件的线度达微米级及以下。这即以自聚焦透镜的发展为标志的早

期发展阶段。目前,这一阶段任务还没有很好实现。

第二步,实现同类光学元器件的组合化、列阵化(列阵元器件),以适应光学元器件进一步微型化和光学并行性的需要。即以微透镜列阵器件的发展为标志的微小光学迅猛发展阶段。

第三步,实现不同类光学元器件的集成化、多功能化(光集成元器件),发展三维集成光学思想、理论和器件,大力开展微小光学在信息领域中的应用。可以预料,这一阶段将以三维光集成器件的发展和应用为主。

当前,要进一步丰富和发展阵列光学理论,不断改进和革新微小光学元器件制作工艺,采用新的、更先进的微加工方法,加速发展列阵光学元器件和提高分立光学元器件的质量,这是微小光学的基础工作。在此基础上,不断完善三维光集成器件的新构思,研制多种三维集成光学元器件,并在光通信、光信息处理和光计算技术中广泛应用。

总之,微小光学的总目标是实现光学元器件的微型化、轻量化、阵列化、集成化和多功能化。实现这一目标是一个长期过程,但在科技工作者的艰苦奋斗下,这一宏伟目标一定会实现。

[1] 伊贺健一,应用物理,55-7(1986),611; 西沢敏一, O. E., 88-2(1989),71.
[2] 刘德森,第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会,第四届光计算技术讨论会论文集,厦门,(1992),16.
[3] I. Kitano et al., Jpn Soc, Appl. Phys., 39(1970), 63.

[4] E. W. Marchand, Gradient Index Optics, Academic Press, New York, London, (1978).
[5] 刘德森等,纤维光学,科学出版社,(1987),152.
[6] M. Oikawa and, K. Iga, Appl. Opt., 21-6(1982), 1052.
[7] Y. Gao and Y. Qing, SPIE, 1230 (1990),65.
[8] 刘德森,高应俊,变折射率介质的物理基础,国防工业出版社,(1991),395.
[9] 刘德森等,高速摄影与光子学,19-3(1990),209.
[10] 刘德森,梅锁海,光学学报,12-6(1992),533.
[11] 朱传贵等,光子学报,21-4(1992),310.
[12] P. Langlois et al., SPIE, 1751 (1992),2.
[13] H. Hosokawa and T. Yamashita, Appl. Opt., 29 (34) (1990),5106.
[14] B. Wolf et al., SPIE, 1506 (1991),40.
[15] M. Kawachi, Opt and Quantum Elect., 22(1990), 931.
[16] Y. Koike et al., Appl. Opt., 27-3 (1988),486.
[17] 朱传贵等,第五届全国纤维光学与集成光学学术讨论会,第四届全国光计算技术讨论会论文集,厦门,(1992),391.
[18] 朱传贵等,光子学报,21-5(1992),175.
[19] M. Oilcawa et al., Appl. Opt., 22-3 (1983),411.
[20] K. Iga et al., Fundamentals of Microoptics, Academic Press, Orlando, (1984),195.
[21] Y. Kokubun et al., Elect. Lett., 21-11 (1985), 508.
[22] Y. X. Chen, Optoelectronics-Devices and Technologies, 5-1 (1990), 109.
[23] K. H. Brenner, SPIE, 1506 (1991),94.
[24] K. Imanaka, SPIE, 1571 (1992),343.
[25] N. Streibl et al., Appl. Opt., 30-19(1991),2739.
[26] A. W. Lohmann, S. Sinzinger, Appl. Opt., 31-26 (1992),5447.
[27] M. Oikawa et al., SPIE, 1571(1992),240.
[28] K. Hamanaka et al., Appl. Opt., 29-28(1990), 4064.
[29] M. Agu et al., Appl. Opt., 29-28(1990),4087.
[30] S. Kawai et al., SPIE, 1751(1992),255.
[31] K. Hamanaka, Opt. Lett., 16-16 (1991),1222.
[32] M. Fukui, K. I. Kitayama, Appl. Opt., 31-26 (1992), 5542.

环太平洋光纤通信进展

吴德明 李爱国

(北京大学无线电电子学系,区域光纤通信网与相干光纤通信国家实验室,北京 100871)

自从1989年第一个跨太平洋海底光缆通信系统 TPC-3 投入运营以来,环太平洋光纤通信网迅速发展。许多重要的新技术,如光纤放大器技术,色散位移光纤技术,光孤子通信技术和波分复用光纤通信技术,正在或将在通信网中应用。

环太平洋区域包括亚洲、南北美洲和澳洲, 有美国、日本、加拿大等经济大国、蓬勃发展的