

# 微 光 学

李育林 傅晓理

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘要** 微光学是一个新的光学学科分支。近年来,人们对以微制造技术生产各种光控微小光学元件阵列注入了浓厚的兴趣。本文评述了微光学研究和发展的现状和前景,其中包括二元光学、梯度折射光学、纤维矩阵光学等。给出了一些应用实例及在许多领域的应用潜力。

**关键词:** 微光学; 二元光学; 小型光学元件

## 1 引 言

近几年来随着微电子学(Micro-Electronics)和光电子学(Optoelectronics)的快速发展,微光学(Micro-Optics)这一新的学科领域的研究正在兴起。微光学是研究一维、二维和三维的小型化光学器件和系统的一门高技术。它涉及到材料研制、设计、精细加工、器件集成以及用其实现光束发射、聚焦、准直、偏折、分割、复合、开关、耦合、接收等功能和光纤传感、光学信息处理、成像系统、光通信、光计算,光互连、光盘、光学神经网络和生物器件等应用研究领域。它与“微机械”、“微电子学”、“微加工”、材料科学、信息科学等学科相互渗透,彼此融合,是现代光学研究前沿的一个重要分支<sup>[1,2]</sup>。这种“微工程”的兴起和发展对二十一世纪的科学技术特别是信息传输工程将产生巨大的影响和推动。

“微光学”一词是由日本电气公司内田楨二教授于1981年首先提出的<sup>[3]</sup>,当时主要指变折射率透镜和微透镜。经过十多年的发展,微光学已经形成了一个比较完整的新学科,特别是自1988年以来,发展非常活跃,截止1992年在西班牙召开的微光学国际会议,已经开过了十多次有关微光学的专题国际学术讨论会。可以预测,今后几年,特别是二十一世纪,将是微光学具有重大发展和广泛应用的时期。

随着微光学研究的继续深入,光学元器件的微型化、阵列化、集成化,光学系统和光电子学系统的信息容量和处理能力将会大幅度地增加,同时系统的稳定性、耐用性、实用性增强,而且成本不断降低。这一宏大的“微工程”的兴起和发展,必将产生巨大的经济效益和社会效益,同时具有浓厚的军事应用背景。

## 2 微光学的主要内容

“微光学”当前主要有两大类：即梯度折射率光学 (GRIN)，日本人按其工作性质比较形象地称为自聚焦透镜 (Selfoc-lens)，它是基于光的折射、反射原理制作的光学元件，主要包括微透镜和阵列；另一类主要是基于衍射原理的二元光学 (Binarg optics)。

### 2.1 梯度折射率光学

以 1954 年开始就有梯度折射率棒透镜的描述<sup>[4]</sup>，直到 1969 年，利用离子交换技术研制成功梯度折射率材料，梯度折射率光学才真正步入实际应用研究<sup>[5]</sup>。这类光学元件是利用物理的或化学的方法使光学材料 (玻璃、晶体、半导体、聚合物等) 的折射率沿元件的径向、轴向或曲面方向逐渐变化，形成相应的折射率梯度分布，由此达到使光线的偏折。在常用的离子交换工艺中<sup>[6]</sup>，其扩散方程的数值解析表达式为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[D(C) \cdot \vec{\text{grad}} C] - \mu(C) - \mu(C) \cdot \vec{E} \cdot \vec{\text{grad}} C \quad (1)$$

式中  $C$ ：扩散浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )， $D(C)$ ：扩散系数 ( $\text{cm}^2/\text{S}$ )， $\mu(C)$ ：化学迁移率 ( $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{S}$ )， $E$ ：电场强度 ( $\text{V}/\text{cm}$ )， $t$ ：时间 ( $\text{S}$ )， $\text{div}$ 、 $\text{grad}$  分别为散度和梯度符号。

产生的折射率分布可近似表达为：

$$n = n_0(1 - \frac{A}{2}r^2) \quad (2)$$

式中  $n_0$ ：中心轴上的折射率， $A$ ：折射率分布常数， $r$ ：由中心沿径向方向的距离。其光线轨迹沿光纤作正弦曲线变化如图 1 所示。

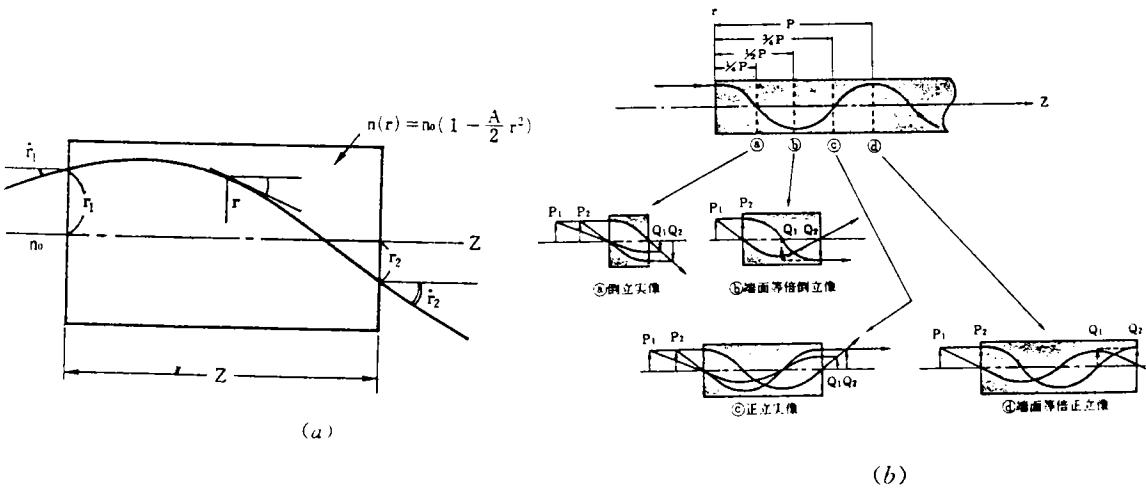


图 1 (a) 自聚焦棒透镜的光线轨迹； (b) 自聚焦透镜成像形式，(P 为周期节长)

梯度折射率光学是微光学研究的先导和基础，一直受到重视。自从1969年由离子交换法制成了自聚焦透镜以来，相继发展了离子填充法、晶体生长法，离子束辐照法、化学/物理气相沉积法、热扩散光敏共聚法等技术<sup>[7,8]</sup>。采用以上工艺制作的微透镜尺寸小，数值孔径大、焦距短。例如用离子束照射塑料制作的半球形微透镜厚度只有(0.004~0.6) mm，直径仅为(0.004~0.4) mm，数值孔径可达0.32~0.75，焦距只有(0.02~0.4) mm。

光学元件的微型化，进而阵列化，可以有效地发挥光子信息载体的高速度、并行性和多通道的巨大互连能力。微光学阵列器件的出现促进了微光学应用的迅猛发展，而阵列器件的发展又在很大程度上依赖于“微加工”技术。已发展的阵列器件微加工技术有经典法<sup>[9]</sup>，成形法<sup>[10,11]</sup>，变折射率法<sup>[12,13]</sup>，气相沉积法<sup>[15]</sup>，溶胶—凝胶加工法<sup>[14,16]</sup>等。其中有机聚合物材料的梯折透镜有很大的发展潜力。

## 2.2 衍射光学(二元光学)

二元光学是基于光的衍射原理(目前是标量衍射理论)，用计算机设计产生掩模并采用二进制用光刻腐蚀工艺(掩膜及电子束、离子束、激光束、X射线束刻蚀)一般是明暗两种情况，形成多级相位型衍射元件。例如第 $N$ 次掩膜刻蚀厚度可表示为：

$$d = \frac{\lambda}{2^N(n-1)} \quad (3)$$

式中 $n$ 为基片折射率

$N$ 次刻蚀后可达到的衍射效率为：

$$\eta = \left[ \frac{\sin(\pi/2^N)}{\pi/2^N} \right]^2 \quad (4)$$

如果4次掩膜刻蚀，则 $N=4$ ， $\eta=98.7\%$ 。由此可以看出二元光学元件具有很高的衍射效率，几乎可产生任意开关的波前，由此可用于进行波前的变换。图2为4个相位级的菲涅耳透镜阵列。

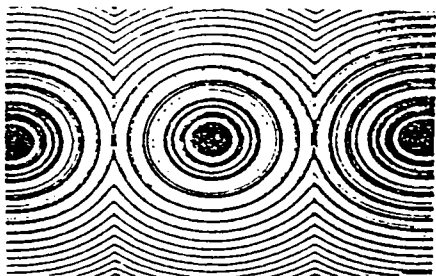


图2 4个相位级的二元菲涅耳透镜模样

这种二元光学技术特别适合于相干微透镜阵列的制作，其中微透镜的边界容易做到整齐和尖锐，填充系数可达100%，而且重量轻，造价低，易于微型化、阵列化。它与经典光学元件组合可以改善其光学性能(视场和孔径角)参数及成像质量(对比度和分辨率)，还可以实现与经典元件的色散补偿。这些特点可促进光学仪器和元件向集成化、多功能化发展。有关二元光学的详细论述在其它文章中已有报道<sup>[17]</sup>

### 2.3 平面光波导

光波导用来导引光学信号的传递，正如微电子学中用导线传递信号。然而，光波导对光波的限制往往受到光学集成度和性能的影响。目前人们感兴趣的主要是基于光刻离子交换技术制作的掩埋式、聚焦型光波导<sup>[3]</sup>。LiNbO<sub>3</sub> 晶体具有良好的电光特性，掺 Ti 的 LiNbO<sub>3</sub> 平面光波导工艺受到很大的重视。M. Kawachi 提出了在 Si 基片上通过火焰水解沉积工艺制作平面光波导<sup>[18]</sup>，并利用它制作了具有多种功能（如分波、合波、波分复用）的 Mach-Zeder 干涉仪和 8×8 热光开关阵列。在 III-V 族半导体材料上制作光波导和器件为光电子集成回路的发展呈现出光明前景。采用界面凝胶共聚工艺制作的聚合物波导，由于可以沉积于多种衬底之上和具有良好的导波特性和，有很大的应用价值和发展前途<sup>[19]</sup>。

光通信和信息处理技术的发展大大地促进了平面光波导的发展。这些波导器件的多种功能，如方向耦合器、光调制器、偏振转换器、分波/合波、波分复用/去复用、光开关、滤波器等。近年来，平面光波导、特别是非线性波导光学理论，器件和应用得到迅速发展，平面光波导工艺也得到更加重视和深入研究。

### 2.4 三维集成光学器件<sup>[20]</sup>

集成光路以往只能处理一维光信息，而且不同功能的器件沉积在同一基片上，在工艺上存在着很大的困难。1982 年 K. Iga 提出了三维集成光学器件的概念<sup>[21]</sup>。他指出在同一基片上只制作一种功能的光学元件阵列，然后把不同功能的基片再纵向叠合起来，从而实现多功能的集成，并称“叠合平面光学”。

随着微光学和集成光学的发展，人们研究了光电子集成回路（OEIC）、光集成回路（OIC）和光子集成回路（PIC），与此同时提出了一个微小混合集成元器件的概念—微小光子器件（MPD）<sup>[22]</sup>。所以三维集成光学思想的提出和三维集成器件的出现是微光学发展的深入和拓宽。

## 3 微光学应用的研究和开发

### 3.1 自聚焦微透镜阵列用于超小型复印机方面的研究

微光学器件的应用推动了微光学研究的发展。比较成熟和完善的自聚焦透镜阵列板已广泛地应用于复印机、传真机、打印机之中<sup>[23]</sup>。图 3 所示分别为复印机和传真机中的透镜阵列板。

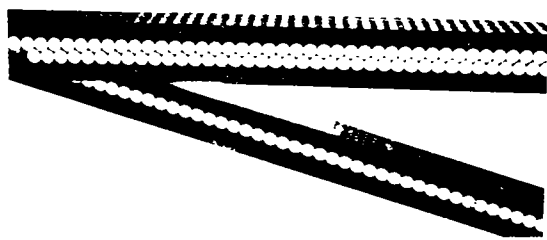


图 3 用于复印机和传真机中的微透镜阵列板

英国人采用一种径向梯折棒透镜阵列<sup>[24]</sup>，使大型文件形成拷贝件并且有非常短的共轭距（可缩小到 25mm），对如此小型包装来说用普通光学元件是难以奏效的。如图 4 所示的一种铁电液晶器件印刷头的无件框图。这种微透镜阵列中的每一个透镜的直径约为 1mm，在该阵列中有两排共约 300 个微透镜，而且用传统的方法和材料不能解决大

数值孔径带来的严重色差问题。

### 3.2 微光学和光纤光缆在光通信中的应用

微光学在光通信中的应用大力推动了它的发展和产业化<sup>[25]</sup>。利用微透镜的无源器件（如连接器、波分复用器、隔离器、光开关等）和有源器件（耦合有光源或探测器的尾纤或微透镜）已有商品出售。微光学平面光波导已应用于光通信中作耦合器、调制器、滤波器等。至于光纤的应用美国做了市场预测，可以说这一高利润的刺激推动着整个纤维光学市场，同时预测到光互连器和无源光学的增长是非常惊人的<sup>[26]</sup>。仅纤维光学海底系统从1991年的几百万美元到1997年为125亿美元，每年增长率大于20%，另外在光纤中继或接收发射端的耦合，自聚焦微透镜是最理想的元件。

### 3.3 新型光折光纤的应用研究<sup>[27]</sup>

当代人们对大量数据存储、检索和传输的欲望正在以指数率增长，例如在通信和计算机系统用铜线互连已不能满足这一需求，而是代之以基于纤维光学的网络。由于光缆具有大的数据带宽，低功耗，再加上高密度全息数据存储以及具有 I/O 带宽处理速率与纤维光学空间网络相匹配的其它微光学元件。例如，近几年发展的空间光调制器，使其容易由电子信号转换为光信号，而电荷耦合器件 (CCD) 和检测器阵列可转变光信号反回到电子域。然而基于应用基础研究上的新产品来说，最急需的是新的和改进的材料，其中光折晶体近 10 年来是最有吸引力的适合于数据存储和信号处理的一种材料。用激光加热基座法生长单晶多模光纤或者排列直径从 (100~800)  $\mu\text{m}$  的晶纤阵列，例如用 SBN 晶纤阵列实现全息数据存储<sup>[28,29]</sup>，图 5 给出了激光加热基座法生长晶纤技术示意图。图 6 给出

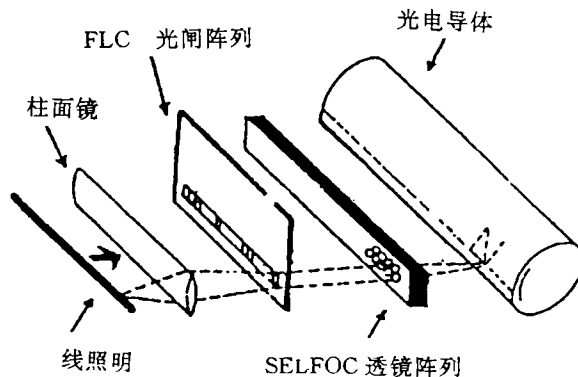


图4 铁电器件LCD和自聚焦透镜阵列构成的复印(传真)机模型原理图

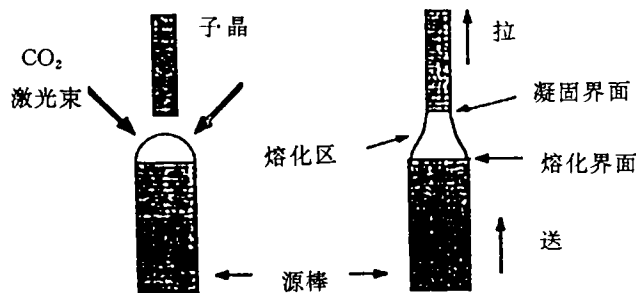


图5 激光加热基座法生长光折晶纤技术示意图

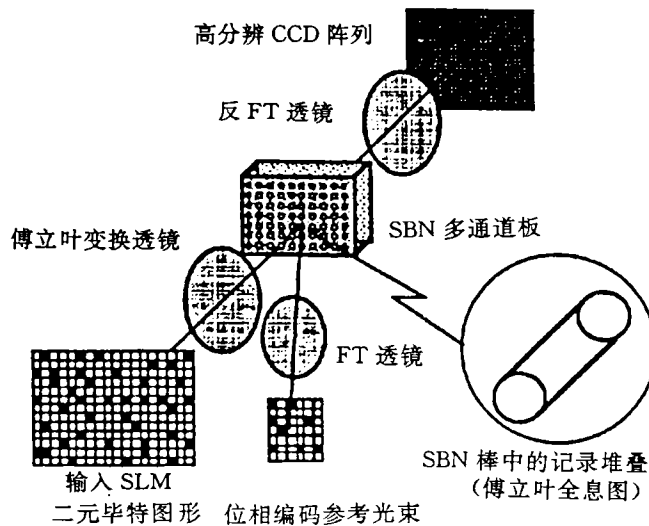


图6 用SBN晶纤阵列实现全息数据存储系统框图

了用晶纤阵列实现全息存储系统框图。

### 3. 4 光互连和微小光学阵列器件的发展

现阶段自聚焦复合透镜面列阵光互连元件和两维空间光调制器等的研究和开发在微光学、光电子学领域显得非常活跃和颇受重视<sup>[30,31]</sup>，如美国 Hughes 公司的液晶光阀，AT & T. Bell 实验室的自由光效应器件 (SEED)，MIT Lincoln 实验室和斯坦福大学的新型光互连器，1992 年日本板玻璃公司 Tsukuba 研究室 K. Hamanaka 等人报道了用 GRIN 平面微透镜阵列在并行光学处理中的应用<sup>[30]</sup>，如图 7 所示。在光计算、光学神经网络中的光互连可以提供密集通道，能充分利用光的并行性和可交叉互连等特点。人们已经应用微透镜阵列进行了多通道成像和多通道变换的研究，用微光学阵列构成了光学神经网络图像识别系统<sup>[33]</sup>。对于用微光学元件进行光学总线、互连、图像交叉开关及三维光电子集成系统亦有不少研究工作<sup>[34,35,36]</sup>。

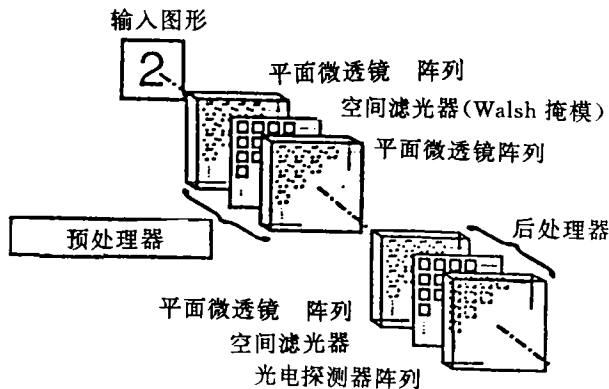


图 7 平面微透镜阵列的光学预处理系统框图

## 4 微光学的发展趋势

微光学已经有十多年的成长过程，目前已经发展成为光学、光电子学领域相对独立的一个学科分支，并且形成了一套比较系统和完整的理论和方法。如微光学材料理论、加工技术、元件设计方法、器件阵列综合成像理论。微光学的测试方法等。计算机在微光学中的应用形成了微光学的计算机辅助分析 (CAA) 和计算机辅助设计 (CAD) 方法。微光学正在迅速深入和拓宽，作为今后的发展趋势大体如下：

1. 微加工工艺的革新和完善，特别是研究微米、亚微米级的微光学工艺技术。
2. 微光学材料的研究和开拓，特别是半导体材料、非线性聚合物材料、光折晶体材料的研究及在微光学中的应用。
3. 微光学元器件的集成化、多功能化发展，特别是三维集成器件的研制。
4. 微光学元件及其阵列的成像、传输理论和设计方法的研究。
5. 微光学产业化发展等。

## 5 结 束 语

微光学的理论和工艺正在不断的发展和成熟如上所述，它将和“微电子学”、“微机械学”紧密结合，形成一项宏大的综合性技术工程—所谓“三微工程”，必将在现代科技进步和经济发展中发挥巨大的作用。因此，这方面的工作十分值得重视。特别是我国的微光学发展起步较晚，目前虽已开展了不少工作，可以说国外有的我们都有了，但还远未达到成熟阶段。这门学科既是应用基础研究，又属“高技术”项目，应该做创新的基础性研究，同时重视把

新原理、新概念、新方法转化为新器件，开展产业化工作。这是我们所期望的，也是本文的结语。

### 参 考 文 献

- [1] 伊贺健一，微小光学. 应用物理, 1986, 55 (7): 661
- [2] 田中俊一，微小光学技术の現状と将来. 《光学》，1987, 16 (2): 42
- [3] K. Nishizawa, et al., Micro-Optics Research Activities in Japan. SPIE, 1992, 1751: 54
- [4] A. Fletcher et al., proc. p. Soc., 1954, 223: 216
- [5] E. W. Marchand, Appl. opt., 1982, 21: 892
- [6] I. Kitano, et al., A Light Focusing Fiber Guide Prepared by Ion-exchange Techniques. Jpn Soc., Appl. Phy. 1970, 39: 63
- [7] D. T. Moore, Gradient-index Optics: a Review. Appl. opt., 1980, 19 (17): 1035
- [8] N. F. Borrelli, et al., Photolytic Technique for Producing Microlenses in Photosensitive Glass. Appl. opt., 1985, 24 (16): 2520
- [9] M. Abitbol, N. Ebenberg, A New Process for Manufacturing Arrays of Microlens. SPIE, 1990, 1334: 110
- [10] Z. D. Poporic, et al., Technique for Monolithic Fabrication of Microlens Arrays. Appl. opt., 1988, 27 (7): 1281
- [11] K. Mersereau, et al., Fabrication and Measurement of Fused Silicamicrolens Arrays. SPIE, 1992, 1751: 229
- [12] M. Oikawa, et al., High NA Planar Microlens for LD Array. SPIE, 1992, 1751: 240
- [13] M. Oikawa, K. Iga, Distributed Index Planar Microlens. Appl. Opt., 1982, 21 (6): 1052
- [14] Jean-Luc, R. Nognes, R. L. Howell, Fabrication of Pure Silica Micro-optics by Sol-gel Processing, SPIE, 1992, 1751: 214
- [15] J. Jahns, S. J. Walker, Two-Dimensional Array of Diffractive Microlenses Fabricated by Thin film Deposition. Appl. Opt., 1994, 29 (7): 931
- [16] T. Chia, L. L. Hench, Microoptical Arrays by Laser Densification of Gel-silica Matrices. SPIE, 1992, 1758: 215
- [17] 李育林. 光学学科的一个前沿课题—二元光学. 光子学报, 1992, 21 (5): 105
- [18] M. Kawachi, Silica Waveguides on Silicon and Their Application to Integrated-optic Components. Opt. and Quantum Elect., 1990, 22: 931
- [19] Y. Koike, et al., New Interfacial Copolymerization Techniques for Lens Arrays. Appl. Opt. 1988, 27 (3): 486
- [20] Y. Korubun, et al., Silicon Optical Printed Circuit Board For 3-D Integrated Optics. Elect. Lett., 1985, 21 (11): 508
- [21] K. Iga, et al., Fundamental of Micro-Optics. Academic Press, Orlando, 1995
- [22] Koichi Imanaka, Microhybrid Integrated Devices and Components, Micro Photonics Devices. SPIE, 1992, 1751: 343
- [23] J. D. Rees, Office Applications of Gradient Index Optics. SPIE, 1988, 935: 28
- [24] L. Banks, New Ferroelectric LCD Printhead Technology, D E Reports March. 1993, 9
- [25] D. E. Lagasse, New Aspect for Exploring Micro-optics-mathematics and Experimental Tools. proc.

Moc/GRIN' 89 (Tokyo) 8, 1989

- [26] S. M. Reiss, Profit Motive Drives Fiber. Optics Market. Optics & Photonics News/Dec, 1992: 71
- [27] L. Hesselink, New Applications for Photorefractive Fiber. Optics & Photonics News, Apr. 1993: 9  
—15
- [28] J. K. Yamamoto, et al., Growth of SBN Single Crystal Fibers. Mat. Res. Bull. 1989, 24: 761
- [29] L. Hesselink and M. C. Bashaw, Optical Memories Implimented with Photorefractive Media. Special Issue of Opt. and Quant. Electr. Spring. 1993
- [30] K. Murashge, et al., Parallel Optical Walsh Expansion in Optical Preprocessor Using GRIN Planar Microlens Array. Cof. on GRIN 1992: 210
- [31] 李育林, 两维空间光调制器及其应用. 光子学报, 1992. 21 (1): 38
- [32] K. Hamanaka, et al., New Applications of Planar Microlenses and Selfoc Lenses, Proc. 10th Inter. Cof. on GRIN., 1992: 210
- [33] M. Agu, et al., Multimatel Filtering Using a Microlens Array for an Optical—neural Pattern Recognition Sgstem. Appl. Opt., 1990, 29 (28): 4087
- [34] K. Hamanaka, Optical Bus Interconnection System Using Selfoc Lens. Opt. lett. 1991. 16 (16): 212
- [35] M. fukui, et al., Design Consideration of the Optical Imaging Crossbar Switch. Appl. Opt. 1992, 31 (26): 5542
- [36] K. H. Brenner, 3-D Integration of Optical System. SPIE, 1991, 1506: 94

## Micro-Optics

Li Yulin, Fu Xiaoli

(*Xian Institute of optics and precision Mechanics Chinese Academy of sciences, xian 710068*)

### Abstract

Micro-optics is a new branch of optics. There is considerable interest in micro-optics system made by micro-fabrication techniques to produce arrays of miniature optical components for the control of light, recently. This paper reviews the present status and future potential of research and development for micro-optics, in which includes binary optics, gradient index optics and fibre matrix optics, etc. Some application examples are presented so as to show promising prospect in many feilds.

**Key Words:** Micro-optics, Binary optics, Miniature optical compoment