

集成微光机电系统中的矢量光学问题*

李志远 杨国桢 顾本源

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 集成微光机电(MOEM)系统是近年来迅速地发展起来的一门新兴的综合学科,它融合了微光学元件、微电子器件和微机械结构的优点,不但在技术上有重要的应用,还蕴涵着与小尺寸器件有关的力学、热学、电学、光学,以及材料科学等丰富的基础科学研究课题.文章探讨了 MOEM 系统中典型的微光学元件,如衍射微透镜、折射微透镜和微光栅中的矢量光学问题,简要地介绍了相应的求解方法.

关键词 集成微光机电系统,微光学元件,光的矢量衍射理论

VECTORIAL DIFFRACTION OF LIGHT IN MICRO- OPTO- ELECTRO- MECHANICAL SYSTEMS

LI Zhi Yuan YANG Guo Zhen GU Ben Yuan

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Micro - opto - electro - mechanical systems (MOEMs) combine micro - optic, micro - electronic, and micro - mechanical elements into integrated devices. MOEMs promise wide technical applications as well as fruitful scientific problems concerning micro - devices. The propagation of light in micro - optic devices such as microgratings, diffractive microlenses, and refractive microlenses in MOEMs is discussed in detail. These problems must be solved by vectorial diffraction theory.

Key words MOEMs, micro - optic elements, vectorial diffraction theory of light

1 集成微光机电系统

近年来,集成微光机电系统(MOEM)受到空间、汽车、生物和通信等众多产业部门的关注,而迅速地发展成一门新兴的综合学科^[1-3].随着微细加工技术的发展,集成微光机电系统可在一个芯片上融合微光学元件、微电子器件以及微机械结构于一体,具有体积小、重量轻、能耗低、价格低、集成度高,以及易批量制造等优点,已经在某些军事和工业中得到了应用.随着 MOEM 技术的不断进步,它必将在 21 世纪的高新技术产业中占据重要的一席之地.除了技术上的重要应用外,集成微光机电系统中还蕴涵着与小尺寸器件有关的力学、热学、电学、光学,以及材料科学等丰富的基础科学研究课题.

为了对 MOEM 系统有一个感性的认识,我们介绍一下近年来在投影仪和 DVD 等数字式显示技术中颇受青睐的数字式微镜子器件(DMD)^[1].如图 1 所示,DMD 包含 3 个部分,最外层的微平面镜,

大小约为 $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$,中间一层为微小的铰链和轭等机械元件,两边各安一个电极,施加适当的电压后,可使镜子朝 $+10^\circ$ 和 -10° 两个方向偏转,入射的光线将被反射到不同的方向上,接收屏幕上出现明暗两种光信号,可当做 1 或 0 bit.机械机构的下面联结着一个金属薄片,上面也安装着电极,控制上层轭的转动方向.这些器件固定在排布有集成电路 CMOS 管的衬底材料上.这样,通过控制 CMOS 管的状态,可实现投影光信号的数字式分布.在这个 MOEM 系统中,微光学元件、微电子器件,以及微机械结构紧密地结合在一起,共同完成所需要的功能.DMD 器件可实现信号的数字式传输、显示和存储等功能,具有体积小、重量轻、能耗低、集成度高等优点,且能大量地生产,所以得到信息产业界的高度重视.以此制成的投影仪,像素的分辨率可达到 800×600 (SVGA),图像的反衬度优于 100:1,可达到 400:1.

* 国家自然科学基金资助项目

1999 - 03 - 09 收到初稿,1999 - 03 - 31 修回

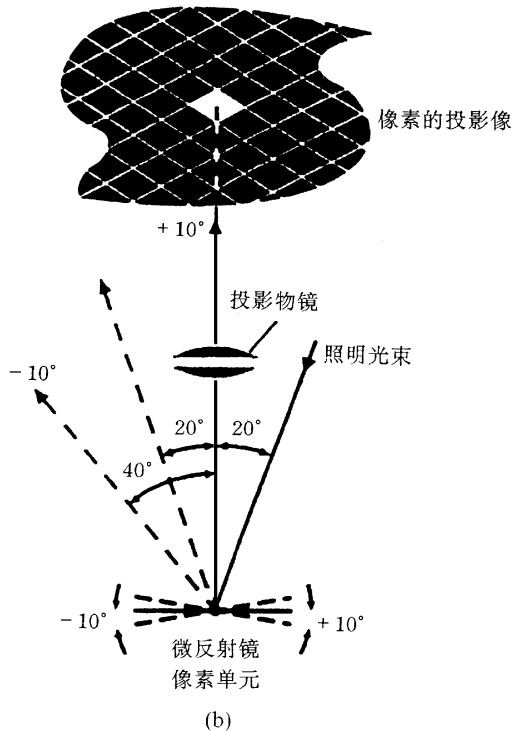
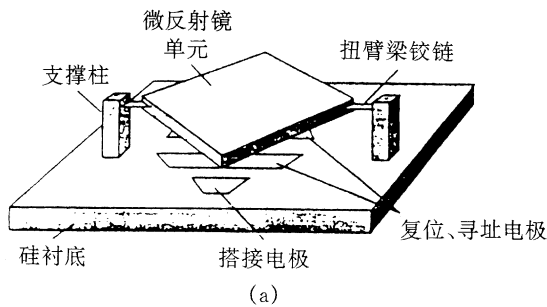


图1 DMD结构及功能示意图

由于 MOEM 系统包含有丰富多样的光、机械、电子等微小元件,由此带来的不仅有微细加工技术上的难题,还包含着与小尺寸器件有关的基础研究问题,比如微机械的尺寸效应,微结构的阻尼、摩擦和表面问题,微结构的热学、力学、流体传输和电泳问题,以及微光学元件的近波长光传播问题,等等。因此说,MOEM 系统是一门综合的、交叉的、多学科的科学技术。下面我们将较为详细地讨论 MOEM 系统中微光学元件的光学问题。

2 MOEM 中的微光学器件及其矢量光学问题

微光学器件在众多的集成微光机电系统中,起着十分关键的作用,尤其是在通讯领域的应用中^[1]。图 2 所示为一个典型的微光学系统,其中的微光学器件全部做在一个硅芯片上,包括半导体激光

器、菲涅耳微透镜、分束器、微平面镜、微光栅,以及光电探测器。其他的微光学器件有衍射微透镜、折射微透镜、法布里-珀罗干涉腔,以及光纤等。它们在微型机械电子系统的控制下,可以方便灵活地实现光的反射、折射、会聚、选频等功能,从而实现光通讯信号的传输。另外,各种光学元件分布在真空中,避免了色散效应,由于尺寸小,结构紧凑,大大缩短了信号传输的时间,提高了器件响应的速度。有三维可调谐的法布里-珀罗干涉仪,置于可旋转的平台上,可以实现光的选频功能。微平面镜可在光纤数据分布界面(FDDI)器件中,实现光信号的传导开关操作。如图 3 所示,两对共轭的光纤的端口之间置有在微机电系统控制下可左右移动的微平面镜,当镜子位于端口处时,信号处于关闭状态,而当镜子离开端口时,信号处于导通状态。此外,微透镜与微机电元件相结合,可制成二维的光学扫描仪。

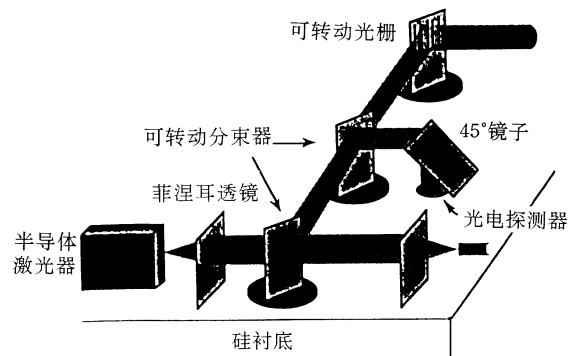


图2 集成于硅芯片上典型的微光学系统结构示意图

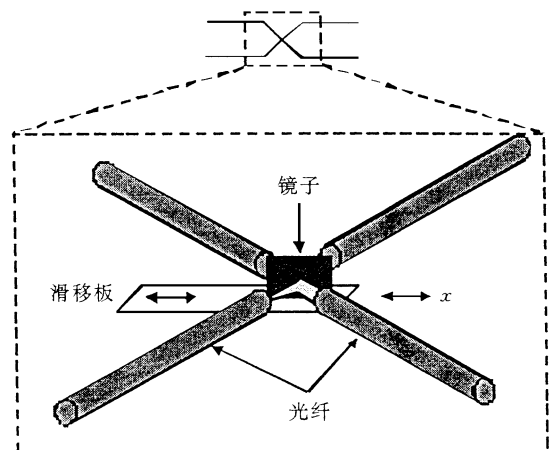


图3 FDDI 中微平面镜的光学开关示意图

随着微光学器件制作水平的提高,有必要深入理解器件的光学性能。传统的光学器件中的光传播问题,可由基于基尔霍夫(Kirchhoff)公式的标量衍射理论精确地求解。由于微光学元件的尺寸很小,一般为几十到一二百微米,器件的精细尺寸与波长可

以比拟,光的散射效应变得十分显著起来,因此必须考虑光的矢量衍射特性.以纯相位型的衍射透镜为例,其直径 D 约 $100\mu\text{m}$,而厚度在一个波长左右,表面起伏的精细结构的横向尺寸为波长量级.透镜的焦距 f 可做得很短,小于透镜的直径,属于菲涅耳深区,不能应用标量衍射理论来计算焦点处的光场分布.光被衍射微透镜的衍射,可以利用标准的电磁波散射理论求解.其他的微光学元件的光传播问题,也需要考虑光的矢量性质.不同类型的器件,其求解方法也各不相同.

可以说,MOEM 系统中的近波长光学问题,主要的考虑 3 种典型的微光学器件,即微光栅、衍射微透镜和折射微透镜.下面我们将简要介绍相应的基于光的矢量衍射理论的求解方法,并和标量衍射理论的结果作比较.

3 各种微光学器件的矢量光学求解方法

3.1 微光栅

所谓光栅,指的是周期性排列的器件结构.光被光栅衍射后,满足布拉格条件的光束将干涉增强,这样将出现一系列的衍射干涉峰.研究表明,当光栅的周期远大于光波长时,可以用标量衍射理论^[4]处理光栅的光学问题.当光栅的周期与光波长可以比拟时,标量衍射理论不再适用,而必须运用光的矢量衍射理论,求解光栅的电磁场分布. MOEM 系统中的微光栅总体尺寸约为 $200\mu\text{m}$,周期为几个 μm ,属于矢量衍射理论的范畴.现在,在光矢量衍射理论的框架内已发展了多种成熟的求解方法^[5],分别对应于各种类型的光栅结构,其中,大多数的理论方法利用光栅的周期性而采用平面波展开的方法,典型的如严格的耦合波方法(RCWT)^[6,7]以及各种修正方法.

当光栅的周期逐渐向波长范围靠近时,光栅精细结构对光的多重散射效应变得显著起来,光栅表面的光场分布是一个未知量,因此不能用基尔霍夫积分公式计算观察面的光信号.这时,可以利用 RCWT 方法计算矢量光信号.模拟计算结果表明,普遍地说,当光栅的精细尺寸小于 14 个波长时($s < 14\lambda$),标量理论的偏差大于 5%,比较显著.当光栅的折射率、深度、量化的级数,以及入射角度等参数增大时,标量理论的精确度将降低.对于八级量化的衍射光栅,当光栅的周期小于 20 个波长时,光正入射时标量理论的偏差大于 5%.

3.2 衍射微透镜

透镜是传统光学中一种重要的器件,通常起光线会聚、发散作用,物体成像等等.在现代的光学信息处理——傅里叶光学中,透镜起着空间频谱分析的核心作用.普通的透镜为弯曲的球面镜,其厚度一般远大于光波的波长,依靠光的折射及衍射效应完成其功能.近年来,随着表面微细加工技术的进步,产生了衍射型的透镜,这是一种纯相位型的光学器件.将普通透镜的厚度减去光波长的若干个整数倍,使得表面起伏的深度在一个光波范围内,便产生了衍射透镜.

衍射微透镜为非周期结构,不能应用平面波展开的方法.光被衍射微透镜的衍射,可以利用标准的电磁波散射理论求解,比如在近场光学里常用的求解电磁近场的自洽方法(SCM)^[8].三维的情况,需要巨大的计算机内存和运算时间,这超出了一般计算机的计算能力.近年来发展的边界元方法(BEM)可以减少这个困难^[9-11].

目前,已经利用 BEM 对二维的衍射微透镜作了模拟计算.近来 Gaylord 小组对衍射柱透镜的透射和反射率、近场光分布、焦点处的光场分布、焦点的位置、焦斑的尺寸、焦斑的衍射效率、旁瓣的强度等许多透镜的性能参数作了详细的讨论,并和各种标量衍射理论的结果作了定量的比较^[11].结果表明,随着透镜焦距-直径比(f/D)的减小,标量衍射理论的精确度降低,而且依赖于所考虑的物理量.

计算表明,矢量衍射理论和标量衍射理论的计算结果的差别,在近场范围内比远场范围内显著得多,这可从物理上得到定性的解释.由于透镜微细结构对光的散射,在近场范围内包含着大量的高频局域化波的成分,它们不能传播到远场处,因而只对近场信号起作用,对焦点处的光场则没有贡献.按照标量衍射理论,近场处的光场比起入射场来说,只增加了相位延迟,而忽略了散射效应,从而高频成分少得多.因此,两种理论算出的近场信号差别很大,而远场信号差别则较小.考虑一个直径为 $D = 50\mu\text{m}$ 的衍射柱透镜.图 4 所示为按照矢量理论和 3 种标量理论——瑞利-索末菲理论 1、2 和基尔霍夫理论计算得到的近场光的振幅和相位分布,入射光是 TE 偏振的.各种标量理论的区别在于采用的光场边界条件的不同^[9].可以看出,矢量和标量理论的差别十分显著,可以说,在近场范围内,标量理论的近似完全失效.在远场时,情况有所不同,标量理论能在一定程度上与严格的矢量理论吻合.定量上,标量理

论算出的焦点处的强度大于矢量理论的结果,即对应的焦斑尺寸则偏小,随着透镜焦距的缩小,误差将显著地增大.透镜的衍射效率是它的一个重要的物理参数,它等于焦斑内会聚的光能量与入射光能量的比值,标量理论计算的衍射效率比矢量理论的结果偏大.

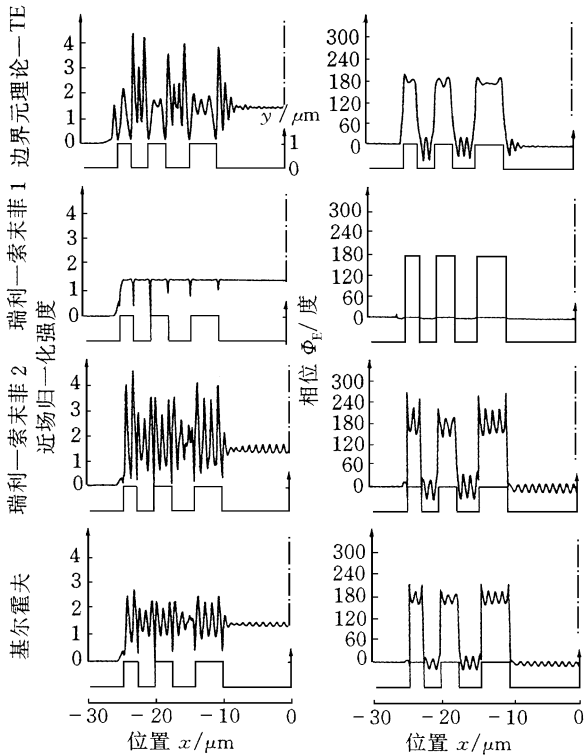


图4 矢量理论 BEM 和 3 种标量理论——瑞利-索末菲理论 1, 2 和基尔霍夫理论计算得到的二级量化 $f/2$ 柱透镜的近场光的振幅(左)和相位分布(右)图

焦点的位置是透镜的另外一个重要参数.在正入射时,标量理论与矢量理论符合得较好.当入射角逐渐增大时,标量理论预测的焦点位置越来越偏离其实际的位置(矢量理论计算值),误差可以超过 10%.可以预计,当透镜的焦距进一步缩小时,对焦点位置的预测将变得不可信.

3.3 折射微透镜

在 MOEM 系统中,折射微透镜的功能同衍射微透镜是相互补充的.在一些短波长($\lambda < 1 \mu\text{m}$)的要求透镜焦距短($< f/4$)的系统中,折射微透镜占有

优势.跟衍射微透镜不同,折射微透镜仍然保持了传统球面镜的形状特征,因此厚度可达到数十个波长.跟衍射微透镜一样,折射微透镜也可以由标准的表面生长技术大批量制作.

由于折射微透镜的直径在 $100 \mu\text{m}$ 左右,厚度超过 $10 \mu\text{m}$,其整体尺寸比光波长大了好几个数量级.如果应用基于体积分割的 SCM 方法求解光的矢量衍射问题,需要的计算机内存及运算量将远远超出一般计算机的能力,因而实际上不可行.这个问题需要发展新的理论处理方法.

4 结束语

集成微光机电系统(MOEM)包含着丰富的基础科学研究课题.为了更好地开发各种微光学器件的功能和实际应用,必须运用严格的矢量衍射理论,发展各种有效的理论方法,来求解微光学器件的光传播问题.这将为实现微光学元件的设计奠定坚实的基础.在这领域里,困难与机遇并存.

参 考 文 献

- [1] Motamedi M E, Wu M C, Pister K S J. *Opt. Eng.*, 1997, 36: 1282—1297
- [2] Van Kessel P F, Hornbeck L J, Meier R E *et al.* *Proc. IEEE.*, 1998, 36: 1687—1704
- [3] Muller R S, Lau K Y. *Proc. IEEE.*, 1998, 86: 1705—1732
- [4] Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*. New York: McGraw-Hill, 1968. Chap. 6
- [5] Petit R ed. *Electromagnetic Theory of Gratings*. Berlin: Springer, 1980
- [6] Moharam M G, Gaylord T K. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72: 1385—1392
- [7] Pommet D A, Moharam M G, Grann E B. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1994, 11: 1827—1834
- [8] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z. *Phys. Rev. B.*, 1997, 55: 10883—10894
- [9] Zhou P B. *Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*. New York: Springer, 1993. 287—323
- [10] Hirayama K, Glytsis E N, Gaylord T K. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1996, 13: 2219—2231
- [11] Bendickson J M, Glytsis E N, Gaylord T K. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1998, 15: 1822—1837