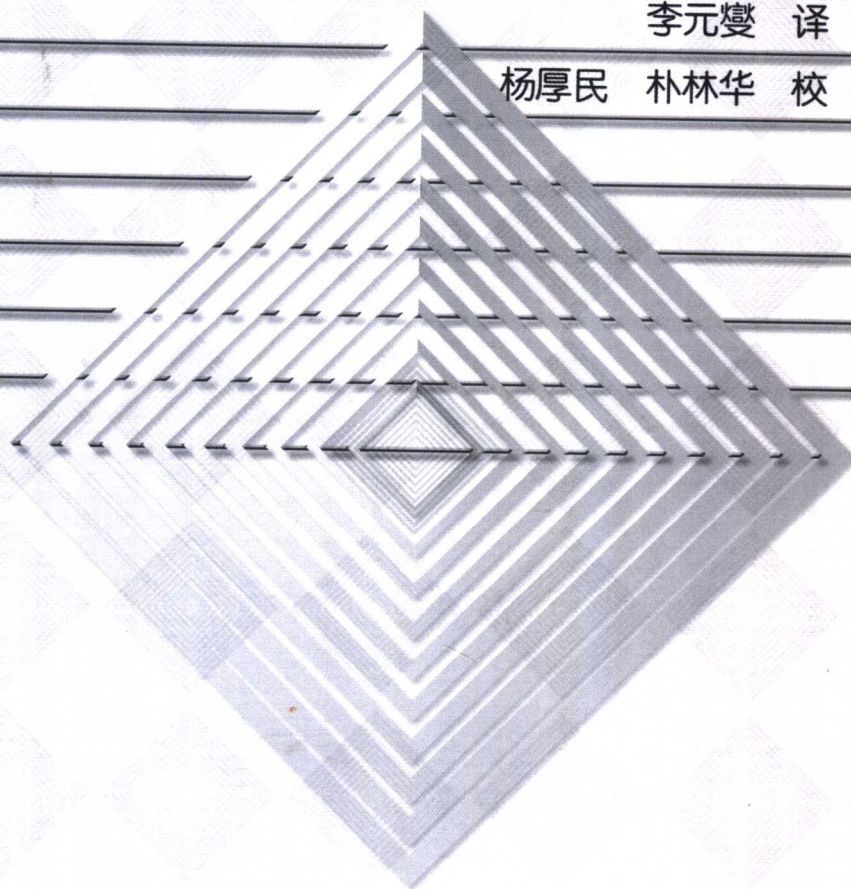


微光机电系统

〔日〕泽田廉士 羽根一博 日暮荣治 著

李元燮 译

杨厚民 朴林华 校



科学出版社

www.sciencep.com

微光机电系统

Optical MEMS/MOEMS

〔日〕泽田廉士 羽根一博 日暮荣治 著
李元燮 译
杨厚民 朴林华 校

科学出版社

北 京

图字: 01-2003-7986 号

内 容 简 介

本书共由三篇构成。第1篇重点介绍微光机电系统在各领域中的应用,即光开关、反射镜阵列、衰减器、显示器、扫描仪、分光计、波长可变光学元件、执行器、可动结构体、传感与传感器等;第2篇是微光机电系统光学,主要介绍微光机电系统中应用的光学原理,即光的反射及折射、干涉、衍射,自由空间光学,光辐射压,近场光学等;第3篇主要介绍材料、制造、封装等。

本书内容新颖,技术先进,涉及的领域广泛,目前国内尚未发现此类专业书籍,具有极高的参考价值。本书可供通信、精密机械、电工电子等相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微光机电系统/(日)泽田廉士,羽根一博,日暮荣治著;李元燮译;杨厚民等校. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-013313-7

I. 微… II. ①泽… ②羽… ③日… ④李… ⑤杨… III. ①光电技术-机电一体化-研究②微电子技术-机电一体化-研究 IV. ①TN2②TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 037675 号

责任编辑:肖京涛 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年1月第一次印刷 印张: 22 1/2

印数: 1—4 000 字数: 431 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

近年来,由于采用半导体微细加工技术,微机电系统(MEMS:Micro Electro Mechanical Systems)得到了快速发展,特别是在光技术领域中的微机电系统应用日趋活跃。由机械运动操作光的具有高性能、多功能光器件的实现,在微型化、高速化、高密度集成化中发挥着必不可少的作用。特别是作为微机电系统的应用,在生物、无线电频率(RF:Radio Frequency,射频)、微光机电系统等领域备受关注。

本书以微光机电系统的最新进展为例,在涉及光学的同时将主要目标锁定在基础课题的提出、新型微光机电系统的提案及设计所必须的基础知识上。

随着文字和静止图像、运动图像等大量信息的日常传送,本地无线通信的扩大,电视广播的数字化等,在国际信息通信中对数据量和通信速度的要求正在爆炸性地增加。为解决这些问题提出构筑光网络(所有功能都在光领域中实现的网络)。微光机电系统是实现它所必不可少的关键技术。例如,在主干节点中 1000 通道以上的输入输出光纤之间的交换无需光电转换,而直接用光信号来交换,这样的大规模交叉连接交换,正是由于有了微光机电系统加工技术才可能得以实现的。它是今后大量数据处理过程中不可缺少的重要器件。

光的最大特点是高速性。但是,它具有传输光的光纤与波导之间连接定位困难的缺点。在 21 世纪的信息通信设施中,并存在着具有信号的高速传送、切换、分波、合波等优点的光回路和具有逻辑、存储、能量储备等优点的电回路。但是,今后不仅在远距离传输中,而且在装置及机器内部也必须推进将信息用光来传递的

光信息化。为此,必须将目前的电配线部分改换成光配线,尽可能采用将信号和数据以光的状态来传送并处理的技术。光的连接需要高精度的定位,因此光与电的结合技术必将成为关键。

在信息技术(IT:Information Technology)革命中,诸如扫描器,微镜阵列显示器等图像处理装置,超小型高密度光存储器的读出、写入装置等,要求低能耗和便于携带。微光机电系统技术不仅在信息通信领域,而且在这种低能耗及便携设备以及其他所有领域有望实现其应有的价值。附录1为主要的微光机电系统。人们不仅要关注其损失小这一点,对波长依赖性小等其他几个优点也不应忽略。虽然光学系统可以做得很小,但如果不能相应地对外围设备进行小型化,则该光学系统小型化的价值只能发挥50%。电子集成电路和控制、封装是能否真正体现本来的微机电系统产品价值的重要因素。

采用光刻法制造的结构物中存在着大的凹凸外,也可以形成执行器,还有光电二极管、半导体激光器、电子光学材料、进行逻辑运算处理的电子集成电路等。通过光取得外部信息,在微小的机器内进行大部分处理工作。再通过无线接收外部指令并将运算结果等信号传送至外部。

考虑小型化时,对目前使用的零部件尺寸缩小一圈也是一种小型化,但要进一步地小型化,必须从基本原理的角度考虑。如果只局限于目前的结构与设计,则小型化也只能是不完全的。利用微机电系统加工技术的小型化将有着可批量生产的效果,且会产生新的应用。

如同硅半导体的形成,光MEMS也能发展到被称为“工业的米”的境地,这是我们所期待的。希望本书能对此有所帮助。

在编写本书时参考了很多学者的研究成果,著者在此表示感谢;同时对为本书的脱稿、出版长期给予协助的欧姆社的有关人士表示由衷的谢意。

著 者

目 录

第 1 篇 微光机电系统

第 1 章 光开关,反射镜阵列,衰减器

1.1 GLV、MARS、DMD 开关等开闭 MEMS 开关	5
1.2 仅用 RIE 制造的开关	6
1.3 光纤,光波导驱动开关	7
1.4 3D 及矩阵式反射镜阵列开关	8
1.5 透镜驱动开关	13
1.6 Si 载物台开关	13
1.7 马赫-曾德尔干涉应用开关(TO 开关)	14
1.8 泡(bubble)移动开关	14
1.9 单轴旋转反射镜	16
1.10 渐逝波耦合开关	16
1.11 可变光衰减器	17
1.12 其他 MEMS 开关	19
1.13 自保持力与消耗电力	19

第 2 章 显示器,扫描仪

2.1 DMD	20
2.2 应用 GLV 的显示器	22
2.3 TMA	23
2.4 反射镜扫描仪(mirror scanner)	23

第 3 章 分光计, 波长可变光学元件

3.1 利用标准具的微型分光装置	28
3.2 利用傅里叶变换分光的微型分光装置	30
3.3 利用衍射光栅的微型分光装置	31
3.4 可变波长激光器, 光电二极管	33

第 4 章 执行器, 可动结构体

4.1 平行平板电极间静电力, 梳状电极执行器	36
4.2 划痕驱动执行器	37
4.3 垂直梳状电极执行器	38
4.4 EDLA 发动机	39
4.5 弹簧, 梁的共振频率, 弹簧常数, 谐振型反射镜	41
4.6 光执行器	51
4.7 液体移动	56
4.8 其他执行器	59
4.9 可动结构, 自构筑执行器	60

第 5 章 传感与传感器

5.1 微小位移的测定	64
5.2 多普勒、血流量测定传感器	81
5.3 加速度传感器	86
5.4 辐射热测量计	91
5.5 生物体测定	92
5.6 生物传感器	97
5.7 光激励振动器	98
5.8 光纤传感器	99
5.9 微小信号的检测	99
5.10 信号处理	103

5.11 光学膜厚及距离的测定	105
5.12 其他测定	107

第 6 章 显微镜

6.1 光学显微镜	110
6.2 扫描探针显微镜	114

第 7 章 存储装置

7.1 光学拾波器的小型化	118
7.2 光探针以外的大容量记录	124
7.3 机构部分的定位控制	124
7.4 机构部分的微机电系统化	125
7.5 超级透镜(Super lens)	129
7.6 光波导型全息照相术	130

第 8 章 微光机电系统的设计与模拟

8.1 交叉连接开关	132
8.2 光学分析实例	134
8.3 GLV 的实例	135
8.4 反射镜控制	136

参考文献	138
------------	-----

第 2 篇 微光机电系统光学

第 1 章 光的反射与折射

1.1 光的数学处理与基本事项	149
1.2 偏振光	151
1.3 反射与折射	155
1.4 散 射	161
1.5 损 失	163

第 2 章 干 涉

2.1 双光束干涉	170
2.2 法布里-珀罗干涉仪	172
2.3 利用折射率变化的波长可变装置	177
2.4 外部谐振型半导体激光器	177
2.5 金属膜的反射光与透射光	179
2.6 马赫-曾德尔干涉仪	183
2.7 迈克耳孙干涉仪	184
2.8 利用广域波长光源的干涉法	186

第 3 章 衍 射

3.1 衍射现象与衍射光栅的作用	188
3.2 各种衍射光栅	190
3.3 衍射的数学处理与衍射光控制、衍射效率	194

第 4 章 自由空间光学

4.1 高斯光束光学	199
4.2 非衍射光束	205
4.3 根据 MEMS 的波面控制	205

第 5 章 光辐射压

5.1 光俘获的原理	211
5.2 激光操纵	219
5.3 激光冷却	225

第 6 章 近场光学

6.1 全反射与损耗波	229
6.2 近场光学的应用	232
6.3 表面等离子体振子	237

参考文献	240
------------	-----

第 3 篇 材料,制造,封装

第 1 章 光学元件

1.1 光学元件	245
1.2 光纤,光波导	252
1.3 微透镜	259
1.4 相互作用	265
1.5 基础衬底	271

1.6 Si 晶体衬底及位错	275
1.7 翘 曲	276
1.8 晶体玻璃	276

第 2 章 制 造

2.1 总的工艺过程	277
2.2 光刻法	278
2.3 膜堆积技术	282
2.4 波导结构的制造	284
2.5 蚀 刻	287
2.6 三维加工	302
2.7 其他加工方法	305

第 3 章 表面理工学

3.1 表面电荷的影响	309
3.2 黏附(作用)	310
3.3 MEMS 中的吸附力	311
3.4 范德华力	313
3.5 剥 离	314

第 4 章 封 装

4.1 光连接器	315
4.2 表面封装	318
4.3 接 合	323
4.4 贯穿孔电极	326
4.5 MEMS 装置的密封	328

参考文献	329
附 录	335

第 1 篇

微光机电系统

第1章 光开关, 反射镜阵列, 衰减器

第2章 显示器, 扫描仪

第3章 分光计, 波长可变光学元件

第4章 执行器, 可动结构体

第5章 传感与传感器

第6章 显微镜

第7章 存储装置

第8章 微光机电系统的设计与模拟

第 1 章

光开关, 反射镜阵列, 衰减器

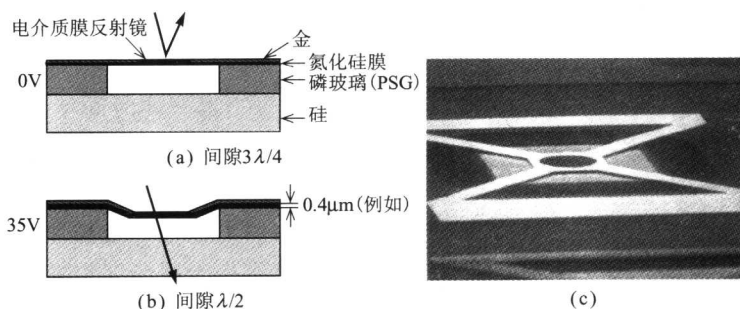
随着波分复用(WDM: Wavelength Division Multiplexing)的普及, 人们对 MEMS 开关的要求愈来愈高。这是由于 MEMS 开关, 特别是利用微型反射镜阵列的光开关(optical switch)对波长的依赖性小的缘故^[1]。目前的开关是电-光(EO: Electro-Optic)转换, 因此通路多时, 不能忽视供给 EO 元件的电源容量。通过连接几个损失比较小的 1×2 开关, 或者扩充使泡(bubble)移动的橄榄开关(Olive Switch), 或者用阵列波导光栅(AWG: Arrayed Waveguide Grating)大致估计 $N_{ch} \times N_{ch}$ 开关的损失时, 能控制 7dB 的通道数 N_{ch} 最多不过 30。从装置的尺寸来看, 石英系列波导的热光(TO: Thermo Optic)开关, 其 8×8 通道的尺寸达 4 英寸(1 英寸 = 2.54cm)。当考虑配线等时, 实际上 100 通道以上的开关, 除 MEMS 以外是不可能存在的。因此为解决这些问题, MEMS 开关受到重视。表 1.1 所示为主要的 MEMS 开关。

对于机械式驱动开关, 人们往往会想到其反应速度慢, 但是微型化时则不然, 特别是开闭(on-off)开关, 其开闭切换时间是很短的。采用无制动器的机械抗反射开关(MARS: Mechanical Anti-Reflection Switch)^[2,3](参见图 1.1)时, 开、闭是高速的。但如后述的数字微镜器件(DMD: Digital Micromirror Device)那样的旋转反射镜式开关, 其开闭时间稍长, 为微秒量级。大多数 MEMS 开关为亚毫秒至毫秒级, 是不太快的。但是, 目前使用的 TO 开关是毫秒级, 因此从这一点看有充分的实用性。质量和惯性矩小并且弹簧及悬臂长度相对短, 因此可以得到很高的谐振频率。反射镜除在扫描仪中使用外, 还可以在用反射镜遮挡一部分光传输路的衰减器中使用。这种衰减器的研究开发工作正在盛行之中。

开闭, 特别是利用三维反射镜的开闭, 其难点与扫描仪和振动传感器不同, 必须在瞬间设定的反射镜旋转角上高精度地停稳。

表 1.1 光开关

微机电系统方式	光纤 • 光纤驱动 • 微反射镜/快门的取送 • 三维反射镜(用正交二轴旋转)的旋转 • 带光纤导向的直线载物台移动 • 微型透镜移动	• 用电磁线圈驱动光纤(洛伦兹力) • 利用直线载物台 • 扭簧旋转、弯曲旋转、直线移动等很多反射镜取送的方法
	平面型波导 • 波导驱动 • 泡/匹配油驱动 • 微反射镜的取送 • 由损耗光的耦合	• 除洛伦兹力外,还利用静电力 • 利用热毛细管现象,喷墨方式 • 与光纤一样,反射镜的取送有很多方法
	光学膜 • 可以改变对置反射镜的间隙 • 衍射光栅膜的移动 • 可以改变衍射光栅栅距	• MARS • GLV(光栅光阀)
非微机电系统方式	• 棱镜驱动 • EO(电光效应)式 • 热光效应(TO效应)与干涉的利用 • 利用等离子体的开关 • 利用磁光效应(MO效应)	• 由微型棱镜的移动来切换光路 • 由电场改变折射率来切换光路 • TO开关:利用马赫-曾德尔干涉 • 利用等离子效应 • 利用磁场改变偏振光方向

图 1.1 高速的 MARS^[3]

1.1 GLV、MARS、DMD 开关等开闭 MEMS 开关

由 6 条氮化硅可动带构成的衍射光栅的 GLV (Grating Light Valve, 光栅光阀), 不仅用于投影仪, 还可作为开关使用^[4]。如图 1.2(a) 所示的宽 $3\mu\text{m}$ 、长 $100\mu\text{m}$ 、厚 $125\mu\text{m}$ 的 6 条带, 相当于一个后述的 DMD 微型反射镜。各带以 $4\mu\text{m}$ 节距排列, 每隔 1 列带上下移动而改变光的方向 (参见图 1.2(b))。所有带都在同一平面时, 反射光沿着入射光路返回。由静电力将隔 1 列的可动带向下移动, 则反射光强度逐次降低而衍射光增强。当可动带向下移动 $\lambda/4$ 时, 衍射光最强而反射光最弱。另外, MARS 开关通过上下移动氮化硅膜片 (membrane) 的方式改变法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 标准具的间隙^[3,5], 从而改变反射光或透射光强度 (参见图 1.1)^[6]。它适用于开闭的开关, 其开闭时间约为 40ns , 是高速的。它还能模拟地改变位移, 作为可变衰减器使用。图 1.3 所示的是把 DMD 反射镜^[7]插入两个输入输出纤维之间, 作为开关使用的实例。

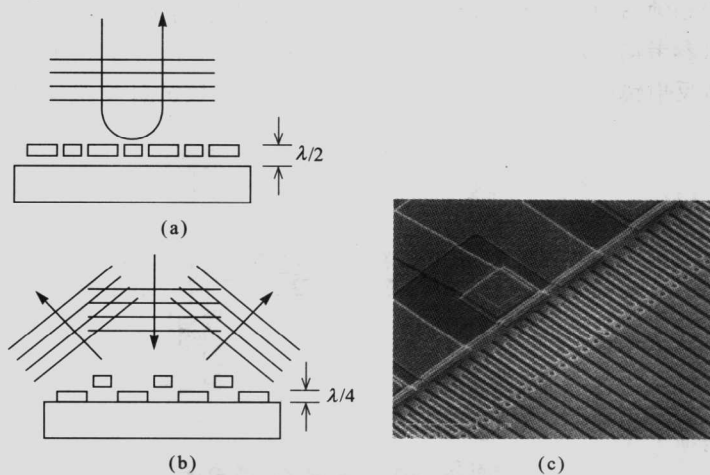
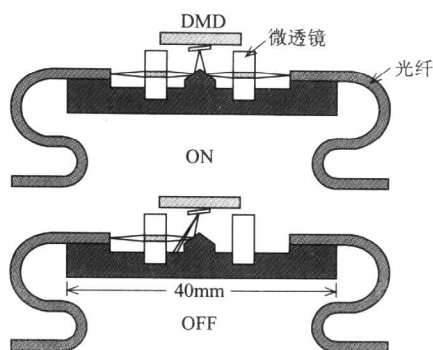
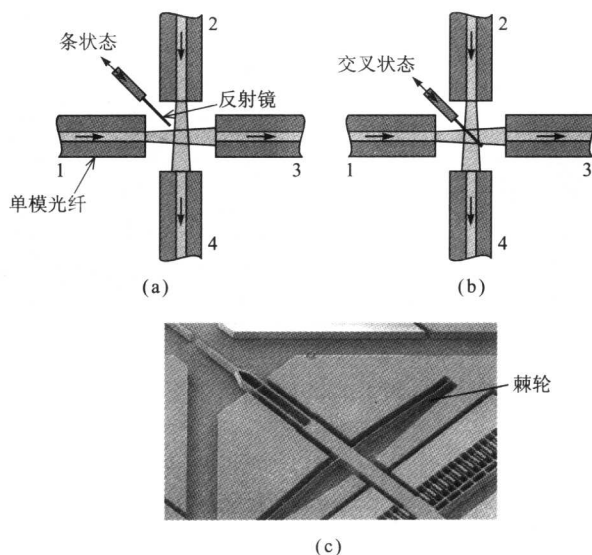


图 1.2 GLV 开关

图 1.3 利用 DMD 反射镜的光开关^[7]

1.2 仅用 RIE 制造的开关

MEMS 执行器中可靠性最高的梳状电极执行器(comb electrode actuator)形成的反射镜进出式开关示于图 1.4^[8~10]。它是采用 **RIE**(Reactive Ion Etching, 反应离子刻蚀)刻蚀 SOI 衬底的 Si 活性层而制造的。值得注意的是将干蚀刻的侧面作为反射镜(参考第 3 篇第 2.5 节)来使用^[11]。梳状电极执行器本身不具备自定位能力,为保持反射镜的进出状态,可制作成利用压曲现象的棘轮机构,其侧面粗糙

图 1.4 仅用 RIE 来制造的 2×2 光开关