第 18 卷　第 3 期　　光　学　学　报　　Vol. 18, No. 3
1998 年 3 月　　ACTA OPTICA SINICA　　March, 1998

全光型硅微机械流量传感器初探

丁　纯　金仲和　喻　浩　徐义刚　王跃林
(浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027)

摘　要　介绍一种新颖的全光型硅微机械流量传感器。给出该传感器结构及工作原理的理论分析, 并阐述传感器样品的测试及结果。流量传感器具有带脊型波导的悬臂梁结构。悬臂梁用作器件的敏感区, 而检测光束可以在脊型波导中传输。

关键词　流量传感器,　微机械,　悬臂梁,　光波导,　各向异性腐蚀。

1　引　　言

自微机械技术问世以来, 由于它所需的材料——硅, 来源广泛, 价格便宜、制作工艺成熟、且与微电子技术有极好的兼容性, 因此, 受到了广大科研人员的普遍关注。国内外已利用这种加工技术, 实现了各种硅微机械结构, 并先后开发和生产了不少结构与性能独特的产品, 其中以硅微机械传感器最为突出, 早已领先进入实用阶段。但是这类硅微机械传感器, 大多是以半导体电子传感器的形式存在, 因此, 伴随其存在的对温度极其敏感的 PN 结漏电及不可避免的电场等, 使之成了在高温、防爆等特殊场合使用时的一道难以逾越的障碍。

本文报道了一种利用集成光学技术和微机械技术相结合而制作的全光型硅微机械传感器。这种传感器利用硅微机械加工技术形成悬臂梁, 并在梁上制作集成光波导, 这种新型的集成光学传感器与电学传感器相比, 具有抗干扰性好、绝缘、防爆等优点, 适合于某些特殊场合的检测要求。

2　理论分析

全光型硅微机械流量传感器采用悬臂梁结构, 如图 1 所示, 传输激光信号的脊型波导制作在悬臂梁上, 该波导在悬臂梁的悬空端中断, 间断距离约为 30~ 50 μm。基模高斯光束振幅的纵向分布规律为:

$$E(z) \propto E_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{W^2(z)}\right] \tag{1}$$

$$W(z) = W_0 \sqrt{1+\left[\frac{z}{z_0}\right]^2} \tag{2}$$

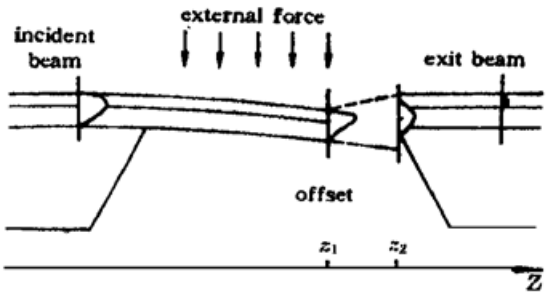

Fig. 1 Schematic diagram of sensor structure

*　国家自然科学基金(69476029)资助项目。
收稿日期: 1996-11-13; 收到修改稿日期: 1997-05-07

式中 W_0 为光束的腰斑半径，$W(z)$ 为任意位置 z 上的光斑半径，Z_0 为光束的共焦参量。由(1)、(2) 式可知，$W(z)$ 随 z 的增大而增大，而场振幅的正态分布曲线也随之变宽变矮。由输入波导出射的激光束光斑半径 $W(z_1)$ 在波导间断区，由于失去了波导的制约而扩展，在输出波导的输入端变为 $W(z_2) > W(z_1)$，此时的光斑面积显然大于波导截面，因此不可能完全耦合进输出波导。利用(2) 式可以估算经过间断区后，光斑面积约可扩展 7% 左右。同时利用正态分布函数的相关公式:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \mathrm{d}t \tag{3}$$

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] \mathrm{d}x, \qquad \left(令\ t = \frac{x-a}{\sigma}\right)$$

$$= \Phi\left(\frac{x_2-a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1-a}{\sigma}\right) \tag{4}$$

取 $a = 0$ 为正态分布曲线的对称点，x_1，x_2 分别为(− 5，+ 5)，即 $x_2 - x_1 = 10$ 为波导截面的线度，σ 分别取 $W(z_1)$ 和 $W(z_2)$ 的值。通过计算可知，激光束经过间断区后，光功率的衰减约为 2.3% 左右，因此，可以认为入射激光束完全可以顺利通过整条波导，到达传感器输出波导的出射端。

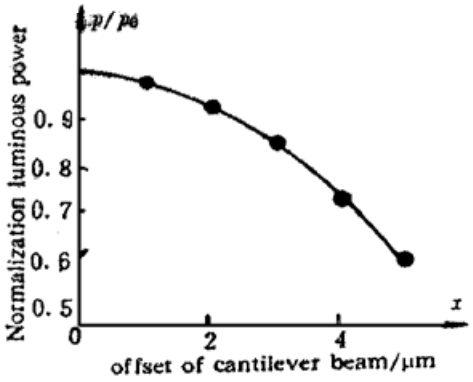

Fig. 2 Theoretical curve on relation of x to P

同时，还可以利用(3)、(4) 式，对器件的工作状态进行理论分析。当被测流量为 0 时，器件的悬臂梁处于平衡位置，输入波导与输出波导处于同一水平，由器件输入端进入的激光束可以直通输出端，并被光探测器所接收；而当气流增大时，悬臂梁将在外力作用下偏离平衡位置，输入波导与输出波导的耦合端面相互错开，从而使耦合进输出波导的光功率变小，光探测器所接收的光功率也随之下降。这就相当于正态分布函数计算中 x_1、x_2 的取值范围($x_2 - x_1 = 10$) 保持不变，但取值区域由原来的(− 5，+ 5)(即悬臂梁处于平衡位置) 变为(− 4，+ 6)(即悬臂梁向下偏移 1 μm)、(− 3、+ 7)(即悬臂梁向下偏移 2 μm)、或(− 2、+ 8)(即悬臂梁向下偏移 3 μm)…等等，利用(3)、(4) 式可以作出悬臂梁向下偏移量 x(取决于流量作用大小) 与输出光功率 P 之间的关系曲线。所得理论曲线如图 2 所示，其纵坐标光功率均以悬臂梁平衡时的输出光功率归一。理论计算表明，外力越大，偏离越甚，光功率下降也越快。

3 实验结果

考虑到光波导效应及硅微机械加工中各向异性腐蚀的需要，制作器件选用(100) 晶向的 N^+(电阻率约为 0.005~ 0.02 Ω·cm) 衬底上外延 N^-(电阻率大于 5Ω·cm) 外延层的硅材料，整个器件制造须进行三次光刻完成。一次光刻，利用各向异性腐蚀工艺，刻出悬臂梁区，留作悬臂梁的硅膜厚度取决于传感器的量程；二次光刻，利用各向异性腐蚀技术刻槽，并完成悬臂梁制作；三次光刻，利用干法腐蚀，完成脊型波导的制作及波导端面的修正刻蚀，以保证波导端面的垂直度，从而避免各向异性腐蚀所固有的槽壁倾角大于硅临界角，而在波导端

面产生全内反射的弊端。

全光型流量传感器的测试装置如图 3 所示，测试光源为波长 1.3 μm 的半导体激光器，激光束经显微物镜准直后，穿过斩波器通光孔，再由高倍显微物镜聚焦，直接耦合进传感器输入波导的输入端(即器件的输入端)，从传感器输出波导的输出端(即器件的输出端)所输出的光束经成像显微镜后，由红外摄像机接收，在监视器上可直接观察到样品波导输出端的出射光斑，其亮度随被测气流的增大而变暗。图 4 所示照片(a)、(b)、(c)即为气流渐次增大时的光斑情况。

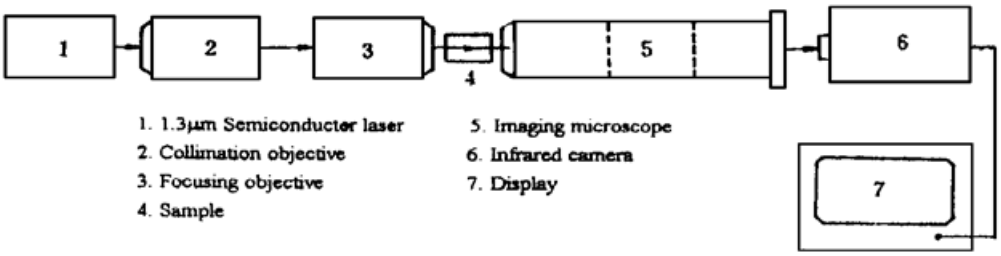

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup for flow-sensor

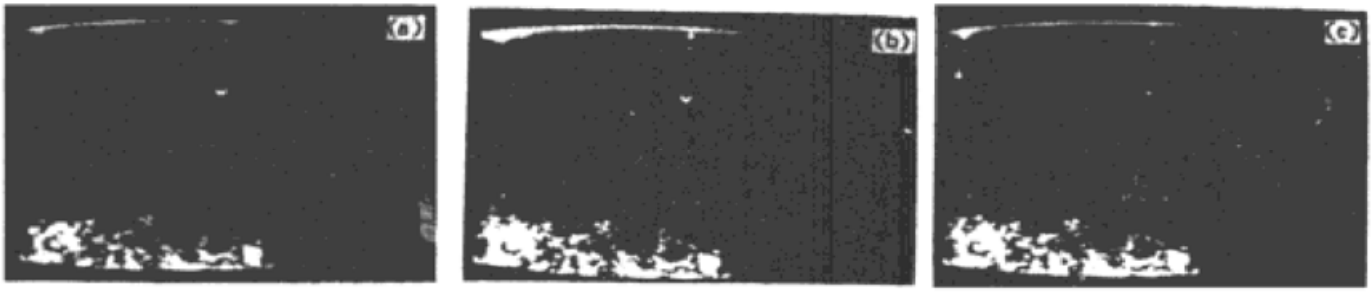

Fig. 4 Output light spot photograph of the flow-sensor

如果将上述测试系统中由摄像机及监视器组成的监视系统，改为由锗探测器和锁相放大器组成的探测系统，并开启斩光器，就可对器件进行定量的测试。测试中，用通过流量计及注射针的氮气对传感器的悬臂梁区域吹气，随着氮气流量的增大，锁相放大器的读数逐渐下降，所测得的反映流量和输出光信号关系的实验曲线，如图 5 所示。由图可见，该传感器有较好的线性，是一种潜在的较为理想的探测器件。

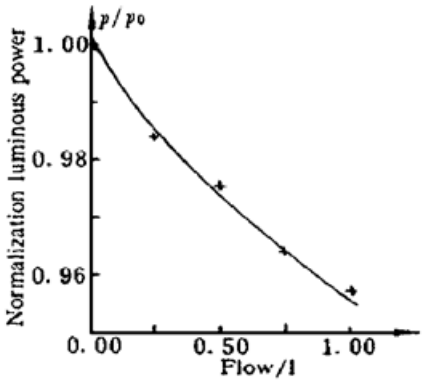

Fig. 5 Experimental curve of the flow-sensor

结　论　本文设计的全光型硅微机械流量传感器，是一种微机械技术与集成光学技术结合的新颖传感器，并且已经在理论和实践两方面都证实了它的可行性。

实验曲线与理论曲线之间存在的差异，除测量误差因素外，理论曲线完全没有考虑输出光波导的损耗也是重要原因。如果损耗为每米百分之几的话，理论曲线中 P 值较高的点，所经受的绝对损耗数值，就比 P 值较低的点要大，这样，扣除损耗以后，理论曲线上的各点斜率，应该会更趋于一致，即曲线更接近线性，更接近实际。

参 考 文 献

[1] 朱祖华, 信息光电子学基础, 杭州, 浙江大学出版社, 1990：33~ 55

Initial Approach for the All Optical Type Sillicon Micro-Mechanical Flow-Sensor

Ding Chun Jin Zhonghe Yu Hao Xu Yigang Wang Yuelin
(*Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou* 310027)
(Received 13 November 1996; revised 7 May 1997)

Abstract A novel silicon micro-mechanical sensor of all optical type is proposed. The theoretical analysis on structure and working principle of the sensor are presented, as well as the test and result of sample are expounded.

The flow-sensor has a structure of cantilever beam with ridge waveguide. The cantilever beam can be used as sensitive area of device and the probing optical beam may transmite in the ridge waveguide.

Key words flow-sensor, micro-mechanical, cantilever beam, optical waveguide, anisotropic etching.