

文章编号 1004-924X(2005)02-0144-07

# 一种可直接脉冲调制的 MEMS 红外激发源

纪新明, 吴飞蝶, 王建业, 周 嘉, 谢海芬, 黄宜平  
(复旦大学 微电子学系, 上海 200433)

**摘要:**针对红外气体探测器对光源的要求,结合现有 MEMS(微机电系统)工艺及与其兼容的 IC 工艺,研制了一种可用于红外多气体传感器的脉冲式 MEMS 辐射光源。该光源主要有  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  的复合支撑层和铂金发热电极组成,可以产生相当于黑体 300~800 K 的红外辐射,在温度  $T=1\ 106\ \text{K}$  时有  $\lambda=2.62\ \mu\text{m}$  峰值辐射波长;并且光源有足够强的辐射强度和 2~15  $\mu\text{m}$  红外辐射波段,能够满足大部分气体在 2~14  $\mu\text{m}$  波长范围内特征的吸收谱线的要求。经过对辐射元的动态测量可知,辐射源的动态调制频率可达到 50 Hz,完全能够满足气体测量对所需红外光源调制频率的要求。

**关键词:**红外传感;微机电系统;辐射系数

中图分类号:TN212 文献标识码:A

## MEMS directly modulating wideband IR thermal source

JI Xin-ming, WU Fei-die, WANG Jian-ye, ZHOU Jia, XIE Hai-fen, HUANG Yi-ping

(Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** A mid-IR thermal source based on electrical heating of platinum film is studied. The IR source with an effectively emitting area diameter of 1.6 mm is obtained from heated platinum thin film resistors that deposit on a  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  membrane. It can emit wideband infrared light with a peak wavelength of  $\lambda=2.62\ \mu\text{m}$  at 1 106 K and adapt to direct modulation with variable voltage. Appropriate heat transfer makes it possible to reach a modulation frequency as high as 50 Hz. Such specifications meet the requirements of various IR gas sensors, and it can be regarded as a new thermal IR source to be used in NDIR (non-dispersive infrared) gas analyzer.

**Key words:** infrared sensor; micro-electro-mechanical system; emissivity

## 1 引言

由于红外气体传感技术良好的选择性

和极低的误报警,使得非色散红外(Non-dispersive infrared NDIR)气体传感方法在气体分析中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。一般的红外吸收气体传感器分为红外激发光源、样

品腔、红外探测器等几个组成部分。而在红外吸收气体传感器的各个部件中,红外光源的激发及其一些相关特性,如热稳定性、调制特性等,在很大程度上影响了探测的准确性和灵敏度。由于最近一些创新性技术的产生,尤其是 MEMS 技术的发展,更促成了红外激发光源发展的飞跃。目前,针对传感系统小型化的要求,结合 MEMS 技术的发展,研制体积更小,性能更优,并能与现有的 IC 工艺兼容,实现大批量廉价生产的红外激发源,成为红外传感体系的一个研究热点。

传统的红外非相干光源由于体积大、波段覆盖范围短、调制频率低(仅有几个赫兹或是不能调制)等缺点,很难满足许多红外传感系统对光源的要求;而发光二极管(LED)和激光源,由于其单一的发射波长,昂贵的价格,使其在气体测量等领域的应用也受到很大限制。目前在多气体监控体系中,一般选用可直接调制的热激发红外光源,这样既可以满足较宽波长覆盖范围的要求,又能减少机械斩波器的使用,减低系统的成本和干扰振动以及噪声。可直接调制红外光源自 80 年代开始研制以来,迅速发展起来。目前多是结合 MEMS 技术,研制一种可直接用于红外传感器的脉冲式 MEMS 辐射源。例如,利用 MEMS 中的厚膜或薄膜工艺制作金属镀膜<sup>[3-4]</sup>或是半导体薄膜<sup>[5]</sup>,或采用多晶硅作为源的加热电极<sup>[6-7]</sup>得到调制激发源,这种源的运作温度可达到 1 500 K,调制频率可达 30 kHz。

本项目研制一种可用于红外多气体传感器的脉冲式 MEMS 辐射源。针对红外气体传感器对辐射源高稳定性、较高调制频率、合适的激发波段和发光功率的要求,结合我们现有的工作及目前红外辐射源的发展,研制一种可用于红外气体探测的直接调制的 MEMS 红外激发源。

## 2 理论模型

我们知道红外辐射的机理类似于灰体辐射,试样升温引起的一个直接效应是光能红外辐射,根据斯特藩-玻尔兹曼定律<sup>[8]</sup>,一个绝对温度为  $T$ ,发射率为  $\epsilon$  的黑体,向外辐射的总能量为:

$$E = \sigma \epsilon T^4, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  是斯特藩-玻尔兹曼常数,当试样被波长为  $\lambda$ 、能量为  $E'$  的能量束照射时,吸收系数为  $\beta(\lambda)$  的试样由于吸收能量而产生一个小的温升  $\Delta T(E', \beta)$ ,则总的辐射能量的增量为

$$\Delta E(E', \beta) = 4\sigma \epsilon T^3 \Delta T(E', \beta), \quad (2)$$

由上式知,使物体受热或是放电,便可产生一定的热辐射。假定过程中热传递和热对流忽略不计,则一个周期内由于温度的变化而引起的功率改变为:

$$\Delta P = c_p \rho d s \Delta T / t, \quad (3)$$

$c_p$  为材料的比热, $\rho$  为密度, $d$  为镀膜厚度, $t$  为激发脉冲的周期。则由式(2)和式(3)可得

$$f = \frac{8\epsilon\sigma T^3}{c_p \rho d}, \quad (4)$$

虽然对于大的温度漂移,此时  $\Delta T$  不再为小值, $c_p$  也不再为常数,公式(4)仅给出近似表达,但其仍可表征一些主要特征。

根据公式(4),调制频率  $f$  是激发体温度  $T$ 、激发率  $\epsilon$  和激发体厚度  $d$  的函数。所以要设计一个合理的红外激发源,涉及到发热材料的选择以及器件结构的工艺实现。对于脉冲式红外光源的设计,首先要满足以下 2 个条件:(1)选用低热惯性的加热材料,就是加热部件的体积与表面积之比要尽可能的小。(2)除了合适的热特性外,还要求元件有好的机械参数和稳定性。结合现有 MEMS 工艺及与其兼容的 IC 工

艺,根据以上讨论的设计原理,对现有的设计模型进行了改进,设计了如图 1 所示的

结构,以期得到性能良好,能满足测量要求的红外辐射光源。

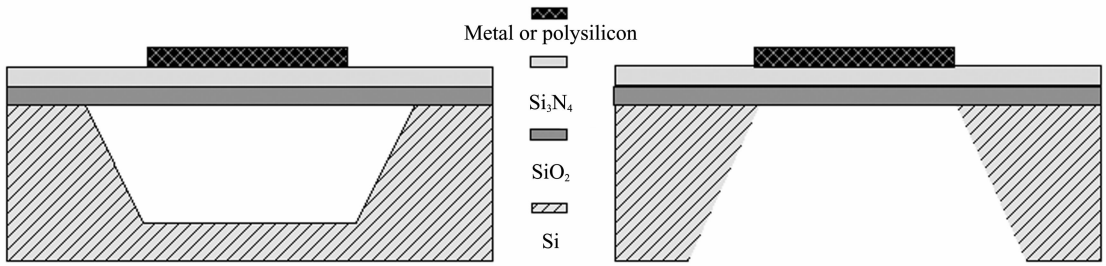


图 1 可直接调制红外激发光源的结构设计

Fig. 1 IR-source models for direct modulation with heat transfer through insulator

对于此种结构,除了热辐射之外,热量可以从发热材料表面通过绝缘层传输。通过绝缘层的热量损失正比于源和衬底的温度差异。对于如图所示多层薄膜结构,膜的平均热导率  $\omega$  与膜的总厚度  $t$  的乘积可表示为具有不同层厚  $t_i$  的各膜层热导率  $\omega_i$  乘积的和。

$$\omega t = \sum_i \omega_i t_i, \quad (5)$$

调制加热的 MEMS 红外光源经过一段时间后,温度的变化可以有以下的公式简单给出<sup>[9]</sup>,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \omega \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + P - L, \quad (6)$$

这里,  $c$  是材料的热容量,  $\rho$  是材料密度,  $\omega$  是热传导系数,  $\epsilon$  为发光率,  $P$  为电功率,即单位体积的能量消耗,是所供电电压  $U(t)$  和与温度变化的电阻值  $R(T)$  的函数。

$$P = \frac{U^2(t)}{VR(T)}, \quad (7)$$

$L$  为过程中的热损失,

$$L = \frac{\epsilon \sigma S(T^4 - T_{\text{air}}^4) + kS(T - T_{\text{air}})}{d}, \quad (8)$$

$\epsilon \sigma S(T^4 - T_{\text{air}}^4)$  是辐射能量,  $kS(T - T_{\text{air}})$  是由于对流而损失的能量。

以上模型中,忽略绝缘层的热存储,而且模型中假定激发率  $\epsilon$  为常数,实际上激发率  $\epsilon$  为激发波长和温度的函数。金属点

亮时的激发率较低,往往小于 0.35,并随温度升高而增加。相对于金属,金属氧化物往往有大于 0.5 的激发率,并且随着温度上升,对于一些非金属材料,如陶瓷和碳,其激发率大于 0.8。不过其  $\epsilon$  随温度上升而下降。

### 3 工艺实现

在热激发红外光源的设计中出现的一个主要问题就是发热材料的选择。设计中选用铂金作为光源的发热材料,之所以选用铂金主要是因为它能在相对较高的温度下正常工作,并有较高的化学稳定性和机械强度,当直接暴露于空气中时不会被氧化。另外,铂金具有优秀的机械延展性,不仅可以制得很厚的镀层,还可以加工得到仅有纳米级厚的铂金膜层。它的缺点主要是小的发光率,在表面光滑的情况下,低温时的发光率仅为 0.08,即使在 1 000 K 时也仅为 0.18。

确定发热材料后,设计合理的 MEMS 工艺实现红外发光器件的制作:

(1) 热生长 650 nm  $\text{SiO}_2$ , 然后用 LPCVD 方法制得 200 nm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层,得到加热电极的支撑层。

(2) 溅射一层 50 nm 的钛黏附层,再

在钛上溅镀一层厚度为 350 nm 的铂金,然后用 lift-off 方法制得所需的发热电极。

(3) 为了提高加热源的辐射率,在铂金层上镀上一层特殊材料的物质层,如  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化层。

(4) 选择背腐蚀工艺,用 KOH 溶液的各向异性腐蚀实现体硅的镂空。只是在腔体背腐蚀过程中,如果将硅片放入腐蚀剂中,容易造成正面辐射表面的不佳乃至损坏。为避免此种状况,实验中,设计了合适的架具,使硅体正面不暴露于腐蚀剂中,从而提高样片的成品率。

(5) 划片,得到单元元件,选用  $\text{TO}_5$  的封装,完成器件的封装。

经过以上工艺,最终得到单元尺寸为  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ,桥梁尺寸为  $1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$ ,引脚尺寸为  $4 \times 10^5 \text{ }\mu\text{m}^2$  的红外激发单元。图 2 给出了最终所得的样管。

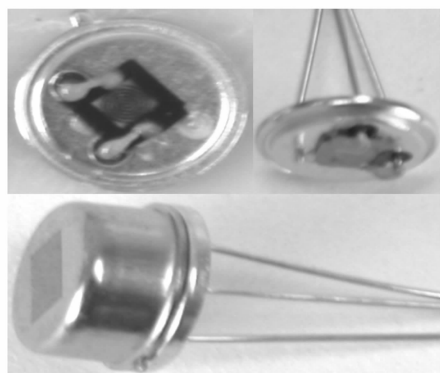


图 2 制得的可直接脉冲调制红外光源  
Fig. 2 Picture of the directly modulated IR source

### 4 结果与讨论

根据红外气体探测器对红外光源的特殊需要,选择合适的测量仪器,完成对调制光源静态和动态的性能表征。

在环境温度为  $25^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 46% 的条件下,用 AGEMA900 热像仪测量样管,得到光源的温度特性。采用温度档:50

$\sim 600^\circ\text{C}$ ,波段:  $8 \sim 12 \text{ }\mu\text{m}$ ,用  $f=9 \text{ mm}$  红外放大镜头进行测试(经过标定),并按等效黑体辐射给出辐射热图,图 3 给出了等效黑体温度(MET)和平均等效黑体温度(AET)与所施加功率的关系,其中光源工作于直流工作模式下。图 4 分别给出了红外光源在低温和高温情况下的温度场分布图。

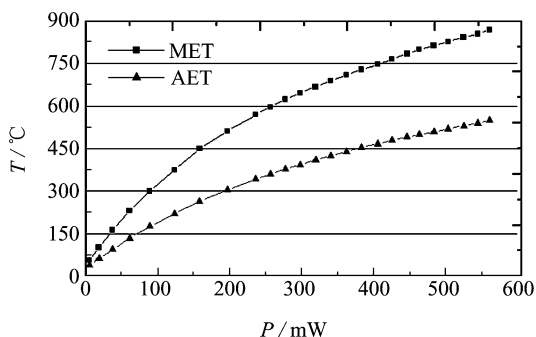
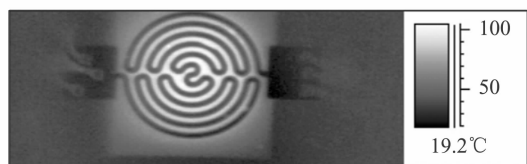
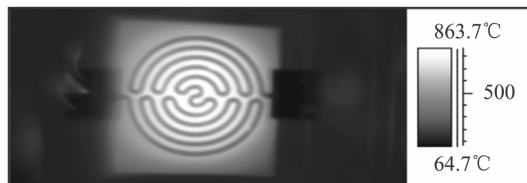


图 3 等效黑体温度(MET)和平均等效黑体温度(AET)与所施加功率的关系( $8 \sim 12 \text{ }\mu\text{m}$ )

Fig. 3 Measured effective blackbody temperature of the IR source in the range of  $8 \sim 12 \text{ }\mu\text{m}$  vs electrical power



(a) 低温  
(a) Low temperature



(b) 高温  
(b) High temperature

图 4 红外光源在低温和高温情况下的温度场分布图

Fig. 4 Thermographic picture of the back-side IR source operating at the low temperature (a) and high temperature up to  $860^\circ\text{C}$  (b)

由图 3 知,在施加 550 mW 的电功率时,辐射单元的等效黑体温度可达  $870^{\circ}\text{C}$ ,而平均等效黑体温度只有  $560^{\circ}\text{C}$ ,其间有  $310^{\circ}\text{C}$  的温度差异。由图 4 薄膜的温场分布可以看出,在整个支撑层上,温度分布呈一定的梯度分布,并且铂金电极呈现出负的温度效应,即铂金电极呈现为低温,而非加热电极所应显示的最高温度,即使实际已经超过上千度。这种现象主要是由于相对于辐射自冷却的加热电极, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  层具有更高的热容量,从而导致支撑层降温更慢,即显示出较高的温度。这里,材料的热传导率起着至关重要的作用,因为具有较高传导率值的材料降温比较快,热量除通过热辐射释放出去外,还通过引脚和支撑层沿着衬底以热传递的方式损耗掉。另一方面,材料的辐射系数也导致了电极负温度效应和最高等效黑体温度与平均等效黑体温度差异的出现。铂金在 1 000 K 时 0.18 的发射率远低于  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层 0.5 的发射率,从而表现为通过电极对  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层加热,进而激发出红外光谱。所以需要就改善辐射源的辐射系数对器件作相应的改进,如将辐射表面纤维化、节化或者覆盖一层高激发率的材料,或者在辐射表面覆盖一层  $\epsilon$  近似为 1 黑金或铂黑,以提高  $\epsilon$ 。

采用 SR5000 光谱辐射计进行器件的光谱测量,光谱辐射计的探测器为液氮冷却的 InSb/MCT,测量时辐射计斩波频率为 800 Hz,测量距离 3.5 m,校准距离 5.6 m,校准锥腔黑体温度为  $T_{\text{bb}} = 400$ 。图 5 给出了制得的 MEMS 红外光源在不同驱动电压下的光谱分布。随着驱动电压的增加,光谱的辐射强度逐渐增加,其波峰位置也随着功率的增加,逐渐向短波方向移动。图 6 给出了平均等效黑体温度为  $390^{\circ}\text{C}$  的样管与  $390^{\circ}\text{C}$  的黑体在  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段辐射的光谱比较。图上可以看出,在平均等效黑体温度为  $390^{\circ}\text{C}$  时,样管光谱

的峰值波长为  $2.62\ \mu\text{m}$ ,韦恩定理知,此时最大的等效黑体温度为 1 106 K。

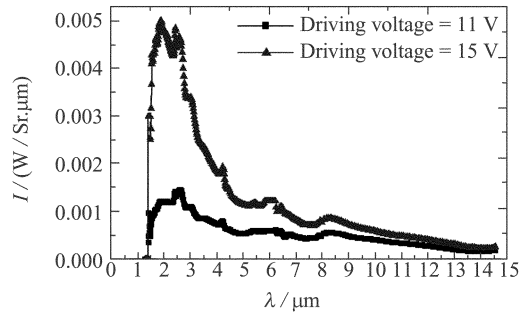


图 5 MEMS 红外光源在不同驱动电压下的光谱辐射出射度曲线

Fig. 5 Measured emission spectrum from the micromachined IR source excited at different powers

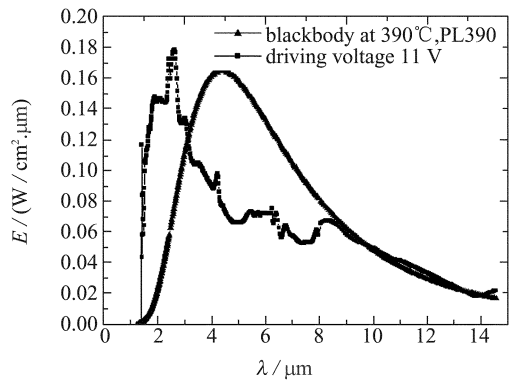


图 6 红外辐射光源在  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  波段等效辐射温度  $390^{\circ}\text{C}$  与  $390^{\circ}\text{C}$  黑体辐射的光谱曲线比较

Fig. 6 Spectral comparison between the MEMS IR source with effective blackbody temperature of  $390^{\circ}\text{C}$  with blackbody at waveband of  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  and  $390^{\circ}\text{C}$

同样采用 SR5000 光谱辐射计,在相同的外部条件下,关闭系统的机械斩波器,完成对器件的动态测量,测量时同时用热释电探测器完成对调制能量的测量。图 7 给出了在不同调制频率下热释电探测器的信号响应。图 8 为不同调制频率下, MEMS 红外光源的调制深度。由测量知,

辐射单元在 100% 调制深度下,加热的响应时间为 28 ms,降温时间为 12 ms,在调制频率为 80 Hz 时,仍有 16% 的调制深度,这足以满足一般红外气体传感器对光源调制频率的要求。

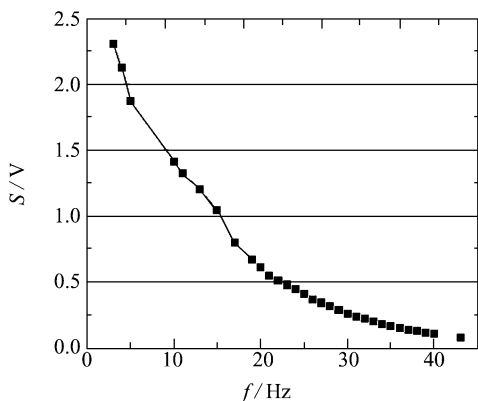


图 7 不同调制频率下热释电探测器的响应信号

Fig. 7 Relative detector signal vs various modulating frequency

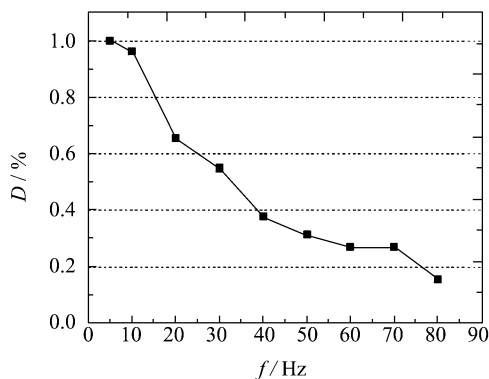


图 8 MEMS 红外光源在不同调制频率下的调制深度

Fig. 8 Modulation depth of the emitted energy at different modulating frequency

## 5 结 语

利用 MEMS 的体硅加工工艺和镀膜技术,针对红外气体探测器对辐射光源的要求,研制出一种可用于红外多气体传感器的脉冲式 MEMS 微辐射光源。该光源主要由  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  的复合支撑层和铂金发热电极组成,可产生相当于黑体 300~800 K 的红外辐射,在温度  $T=1\ 106\ \text{K}$  时有  $\lambda=2.62\ \mu\text{m}$  峰值辐射波长;并且光源有足够强的辐射强度和 2~15  $\mu\text{m}$  的红外辐射波段,能满足大部分气体在 2~14  $\mu\text{m}$  波长范围内特征的吸收谱线的要求。经过对辐射元的动态测量知,辐射源的动态调制频率可达到 50 Hz,足以满足气体测量中对所需红外光源调制频率的要求。

研制成功的 MEMS 微型辐射源使传统的红外辐射源变为可直接调制的辐射源,可直接用于红外气体探测器中,这必将对传感体系的微小型化或是系统的芯片化将产生一定的作用。制作中采用 IC 工艺,是 MEMS 技术在红外传感领域中的进一步扩展。虽然研制开发的脉冲调制辐射源,具有波谱范围宽、调制频率高、微小型化、价格低廉等优点,但就进一步改善光源的性能,如器件的稳定性,结构的合理性,提高器件的调制频率和辐射功率方面等,仍需作大量的工作。

## 参考文献:

- [1] MELENDEZ J, de CASTRO A J. Spectrally selective gas cell for electrooptical infrared compactmultigas sensor[J]. *Sensor and Actuators A*, 1995, 46-47: 417-421.
- [2] CORMAN T, KALVESTEN E, HUIKU M. An optical IR-source and  $\text{CO}_2$ -chamber system for  $\text{CO}_2$  measurements[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(4): 509-516.

- [3] PUTON J, JASEK K, SIODLOWSKI B, *et al.* Optimization of a pulsed IR source for NDIR gas analyzers[J]. *Opto-electronics Review*, 2002, 10(2): 97-103.
- [4] LAINE D C, AL JOURANI M M, CARPENTER S, *et al.* Pulsed wideband IR thermal source [J]. *IEEE Proc-Optoelectron*, 1997, 144(5): 315-322.
- [5] 李守荣, 梁平治, 屈新萍. 红外微辐射元的研制[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 22(4): 277-280.  
LI SH R, LIANG P ZH, QU X P. Development of IR microemitter[J]. *J. Infrared Millim. Wave*, 2003, 22(4): 277-280. (in Chinese)
- [6] BAUER D, HEEGER M, GEBHARD M, *et al.* Design and fabrication of a thermal infrared emitter[J]. *Sensor and Actuators A*, 1996, 55: 57-63.
- [7] MASTRANGELO C H, HIS-JEN YEH J, *et al.* Electrical and optical characteristics of vacuum-sealed polysilicon microlamps[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, 39(6): 1363-1375.
- [8] 陈衡编著. 红外物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 55-90.  
CHEN H. *IR physics* [M]. Beijing: National Defence and Industry of Publishing Company, 1985: 55-90.
- [9] PUTON J, JASEK K, SIODLOWSKI B, *et al.* Platinum IR sources for gas monitors[C]. 24<sup>th</sup> *International Spring Seminar on Electronics Technology*. Calimanesti-Caciulata, Romania, 2001: 186-9192.

**作者简介:** 纪新明(1976—), 男, 山东青岛人, 复旦大学微电子系博士研究生, 现主要从事光学和 MEMS 传感器方面的研究。mail: xmji@fudan.edu.cn