

文章编号: 0253-2239(2010)05-1455-04

基于绝缘体上硅晶片的微机电系统红外光源

钱 昆 李方强 程美英 伞海生* 陈旭远

(厦门大学萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要 提出了一种利用微机电系统(MEMS)制造工艺技术制备的硅基微型红外光源。该光源使用绝缘体上硅(SOI)晶片作为基底材料,其上沉积多晶硅材料并通过离子注入工艺实现材料的电阻加热发光特性,SOI晶片上的单晶硅层通过重掺杂实现辐射光背向吸收自加热效应。利用SOI晶片中的掩埋二氧化硅层为刻蚀停止层,通过背面深反应离子刻蚀(DRIE)技术制备微米量级的薄膜发光层结构。光源表面工作温度和辐射光谱分别通过红外热像仪和光谱辐射计测量得到。实验结果表明,该光源在表面温度约 700 K 时,1.3~14.5 μm 波长内的能量转换效率约为 5.58%,光源的调制频率在 50% 的调制深度下接近 40 Hz。

关键词 光学制造;红外光源;微机电系统;绝缘体上硅;调制;光谱

中图分类号 TN214 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1455

MEMS Infrared Emitter Based on SOI Wafer

Qian Kun Li Fangqiang Cheng Meiyang San Haisheng Chen Xuyuan

(Pen-Tung Sah MEMS Research Center, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract A micro-electro-mechanical systems (MEMS) infrared (IR) emitter is presented. The IR emitters are fabricated on silicon-on-insulator (SOI) wafer, and the resistance heating film on the SOI wafer used boron-doped polysilicon by ion implantation technology. The single crystal silicon on SOI wafer is designed as a heavily-doped infrared absorption layer for realizing the self-heating effect. The light-emitting layer is fabricated by using deep reactive ion etching(DRIE)process on the backside of SOI wafer, and the buried SiO_2 layer of the SOI wafer is used as etching stop layer to control the thickness of light-emitting layer. The surface temperature and emission spectrum of IR emitter are measured by thermal imaging system and spectroradiometer. The experimental results show that in the case of surface temperature of about 700 K, the energy conversion efficiency is about 5.58% in the spectrum range of 1.3~14.5 μm . The experiments also show that the modulation frequency can reach to 40 Hz at 50% modulation depth.

Key words optical fabrication; infrared emitter; micro-electro-mechanical system (MEMS); silicon-on-insulator (SOI); modulation; spectrum

1 引 言

随着国民经济的迅速发展,由工业生产和交通运输等产生的气体对环境的污染越来越严重。红外气体探测技术有良好的选择性,较高的精度及寿命长的特点,是目前气体分析最有效的方法之一。在传统的红外气体探测中,红外光源通常为热辐射光

源,需要加机械斩波器实现光源的调制输出特性,因此体积庞大,增大了系统成本^[1]。早期使用的光源材料为铂金属^[2,3],它具有较高的机械强度和工作温度,但长时间工作下表面易被氧化,导致电阻蜕化失效,且表面发射率较低。近年使用半导体材料碳化硅和金属氧化物作为光源材料^[4~7],测试结果显

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 航空科学基金(20080868011,20080868009)资助课题。

作者简介: 钱 昆(1986—),男,硕士研究生,主要从事 MEMS 红外光源方面的研究。E-mail: Q.kun1005@gmail.com

导师简介: 陈旭远(1962—),男,博士,教授,主要从事微电子机械传感器件及系统的研发、设计与生产,微纳米技术开发和应用等方面的研究。E-mail: xychen@xmu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sanhs@xmu.edu.cn

示了较好的长时间稳定性和电热特性,但生长工艺复杂,制造成本较高。为了良好的工艺兼容性,使用多晶硅^[8,9]作为光源材料是一个理想的选择。

本文设计并加工了一种基于掺杂多晶硅薄膜作为发光材料的新型平面式红外光源,通过使用绝缘体上硅(SOI)晶片以简化制备工艺,并利用自加热效应降低光源功耗。

2 实 验

图1是设计的基于绝缘体上硅(SOI)晶片的微机电系统(MEMS)平面式红外光源结构示意图。该光源设计具有采用微米量级的薄膜发光结构和使用SOI晶片做为基底材料。

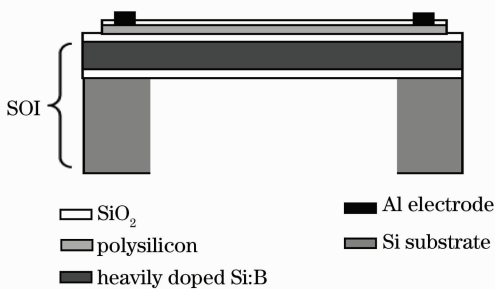


图1 MEMS 红外光源的结构图

Fig. 1 Cross-section of MEMS infrared emitter

MEMS 红外光源的发光结构通常采用微桥式和薄膜式,前者机械稳定性较差且加工较为复杂^[10]。实验通过设计微米量级的光学薄膜结构,可实现较好的机械稳定性,同时具有较高的热质比,从而达到光源快速电加热和辐射自冷效果。

使用SOI晶片有如下优点:光源平面结构的形成采用深反应离子刻蚀技术(DRIE),从SOI晶片的背面一次刻蚀形成空腔时,SOI晶片中掩埋二氧化硅层可以作为刻蚀停止层;为了降低光源能耗,SOI晶片顶部的单晶硅层被设计为重掺杂的红外吸收层,吸收发光薄膜的背向红外辐射并储存热量,达到自加热效应。由于硅中载流子对红外光的吸收与载流子的浓度和类型有密切关系,实验已经发现在相同的电阻率情况下,p型Si的红外吸收效率明显高于n型Si的^[11]。因此,本光源采用重硼掺杂。

光源的制备工艺如下:1)清洗并对5 μm厚的SOI器件层进行硼扩散形成重掺杂硼层;2)对器件层进行氧化,得到400 nm左右的SiO₂层;3)使用低压化学气相沉积技术(LPCVD)在SiO₂层的顶部沉积多晶硅层,然后用热氧化形成顶端SiO₂层。顶端SiO₂氧化层的主要作用是钝化保护和提高表面辐

射率;4)对多晶硅层进行硼离子注入,得到合适的电阻率。然后在1000 °C的氮气氛围中进行离子注入后退火;5)在顶部二氧化硅层中形成电极窗口,通过磁控溅射铝金属形成电极;6)在450 °C氮气氛围中进行合金化退火,以形成欧姆接触;7)使用深反应离子刻蚀(DRIE)技术在SOI晶片背面刻蚀矩形腔,形成微米量级的发光薄膜结构。图2是器件的背面照片及单个光源的同轴封装图。

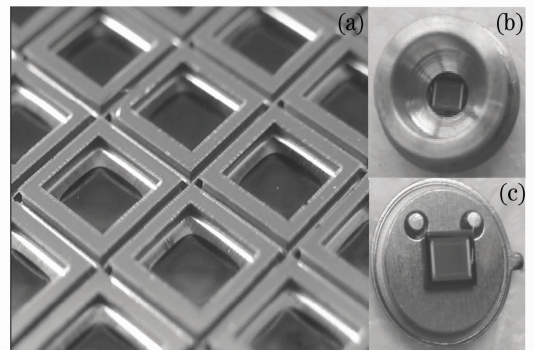


图2 显微镜下器件刻蚀后的背面照片(a)及单个光源的带反射镜(b)和不带反射镜(c)的同轴封装图

Fig. 2 Optical micrographs of the backside (a) of the device wafer and photos of the infrared emitter with coaxial package with reflector (b) and without reflector (c)

3 测试与结果讨论

光源表面工作温度通过AGEMS900热像仪(工作波长8~12 μm)测量得到。实测时室温为23 °C,相对湿度65%。按照二氧化硅在8~12 μm波段的辐射率 $\epsilon=0.5$ 计算,可以得到光源的表面温度。用热像仪测量MEMS红外光源的功率随温度的变化特性,同时用万用表测量光源的动态电阻特性。

图3显示了MEMS红外光源的电阻值随着输入功率的增加而增加,当输入功率超过约2200 mW时,电阻值反而逐渐减小^[12]。这是由其微观特性所决定的。多晶硅电阻由许多小晶粒串联而成,晶粒之间存在着晶粒界面,当达到一定的温度时,晶粒间局部过热而发生再结晶现象,或者形成局部的微细导电通路,载流子迁移率提高,运动到晶粒中参与导电,体内载流子数目增加,导致电阻值降低。图3中还显示了光源的输入功率与器件等效黑体辐射温度的关系。光源的正常工作温度约为600 °C,输入功率约为1.5 W。当输入功率达到2.3 W时,光源表面发出可见红光。当输入功率为2.6 W时,膜的

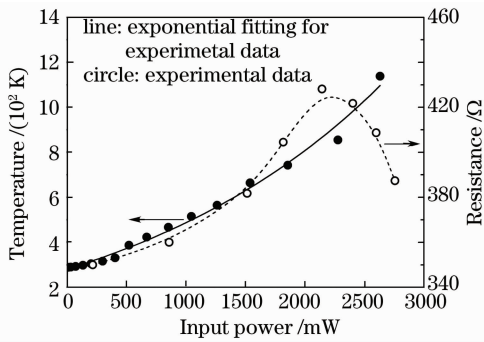


图 3 光源的输入功率与器件表面温度及电阻的关系

Fig. 3 Dependence of input electrical power on emitter resistance and surface temperature

温度达到 1120 K。

图 4 是采用 SR5000 光谱辐射计(工作波长 $1.3\sim 14.5\ \mu\text{m}$)测量红外光源在不同驱动电压条件下的光谱辐射特性,光谱辐射计的调制频率为 800 Hz,测量时探头与光源相距 3.5 m。由图 4 可见,辐射波长覆盖了 $2\sim 15\ \mu\text{m}$ 的中红外区,该范围能满足大部分气体特征吸收谱线的要求。随着输入功率增加,光谱辐射强度加强,辐射峰值向短波方向移动,该现象符合普朗克黑体辐射定律^[13]。MEMS 红外光源的光电转换效率被定义为光谱辐射计在工作波长内所测量到的辐射能量与输入光源的电能比值,测试结果为 700 K 时,光电转换效率为 5.6%,该数值并没有达到设计的数值,认为原因有:光源采用封闭结构,四周与基底接触,热传导损失能量较多;光源表面的钝化层为热生长的二氧化硅层,该材料的比辐射率为 0.5 左右,没有进行表面粗糙化处理。

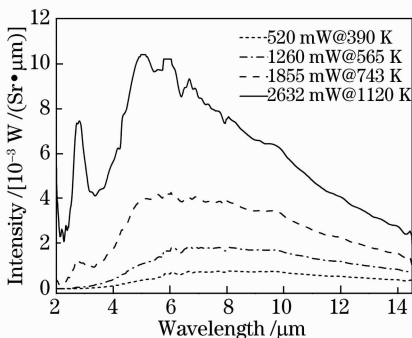


图 4 MEMS 红外光源在不同功率下的发射光谱

Fig. 4 Emission spectrum of MEMS infrared emitter at different input electrical powers

MEMS 红外光源的光谱调制是通过调制输入电流实现的。同样使用 SR5000 光谱辐射计用来测量脉冲辐射,其测量结果通过电压信号输出。实际测量时,调制深度定义为该频率下的响应电压峰峰值与 1 Hz 情况下的响应电压峰峰值的比值。图 5

给出了 MEMS 红外光源的频率响应特性和在 10 Hz 频率时的热像图。从图 5 可以看出,当被调制的输入电流分别为 45 mA 和 80 mA 时,光源调制深度为 50% 时的调制频率接近 40 Hz^[14],完全能够满足红外气体传感器谐波检测的要求^[15]。

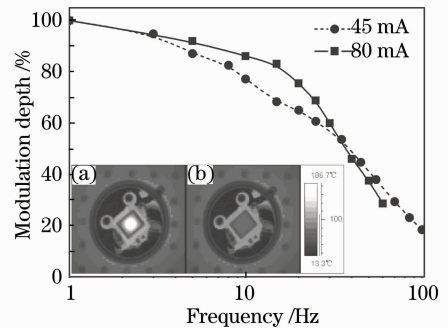


图 5 MEMS 红外光源的频率响应特性和在 10 Hz 频率时的热像图[开态(a)和关态(b)]

Fig. 5 Frequency response characteristics of the MEMS infrared emitter and the thermal image at 10 Hz [on state (a) and off state (b)] is also shown

同时发现被调制电流越大,频率响应曲线越平坦,调制特性越好。这是由于高的调制电流比低的调制电流有更大的能量损耗补偿,从而导致频率响应特性改善。图 5 同时给出了光源在 10 Hz 时的热像图,可以清楚地看到电流在输入(开态)和截止(关态)条件下的器件温度分布状态。

4 结 论

利用 SOI 晶片并结合 MEMS 加工工艺,设计并制备出一种硅基微型红外光源。该光源以 SOI 晶片作为基底材料,使用掺杂多晶硅作为电阻加热发光材料,通过设计微米量级的薄膜发光层结构和重掺杂红外吸收自加热层结构,实现 MEMS 红外光源体积小、能耗低和可调制的特性。该光源可辐射 $1.5\sim 20\ \mu\text{m}$ 宽谱波长,在 50% 调制深度下,光源的调制频率接近 40 Hz。为了提高器件的光电转换效率,在接下来的工作将设计结构为桥式结构,并通过对光源表面进行粗糙化处理实验,改善光源表面的辐射率。

参 考 文 献

- 1 W. Konz, J. Hildenbrand, M. Bauersfeld *et al.*. Micromachined IR-source with excellent blackbody like behaviour[C]. *SPIE*, 2005, **5836**: 540~548
- 2 D. C. Laine, M. Al-Jourani, S. Carpenter *et al.*. Pulsed wideband IR thermal source[J]. *IEEE Proc. Optoelectron.*, 1997, **144**(5): 315~322

- 3 P. E. Lobert, D. Bourgeois, R. Pampin *et al.*. Immobilization of DNA on CMOS compatible materials [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2003, **92**(1-2): 90~97
- 4 F. P. Fehlner. Low temperature oxidation of metals and semiconductors [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1984, **131**(7): 1645~1652
- 5 O. Schulz, G. Müller, M. Lloyd *et al.*. Impact of environmental parameters on the emission intensity of micromachined infrared sources[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, **121**(1): 172~180
- 6 M. Eickhoff, H. Möller, M. Rapp *et al.*. Selective growth of high-quality 3C-SiC using a SiO₂ sacrificial-layer technique[J]. *Thin Solid Films*, 1999, **345**(2): 197~199
- 7 P. C. H. Chan, G. Yan, L. Sheng *et al.*. An integrated gas sensor technology using surface micro-machining[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2002, **82**(2-3): 277~283
- 8 J. C. Belmonte, J. Puigcorbe, J. Arbiol. High-temperature low-power performing micromachined suspended micro-hotplate for gas sensing applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **114**(2): 826~835
- 9 J. Laconte, C. Dupont, D. Flandre *et al.*. SOI CMOS compatible low-power microheater optimization for the fabrication of smart gassensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2004, **4**(5): 670~680
- 10 Z. A. Syed, I. M. William, W. G. Julian. Tungsten-based SOI microhotplates for smart gas sensors[J]. *J. Microelectromech. S.*, 2008, **17**(6): 1408~1417
- 11 D. K. Schroder, R. N. Thomas, J. C. Swartz J C. Free carrier absorption in silicon[J]. *IEEE J. Solid-State Circ.*, 1978, **13**(1): 180~187
- 12 Dong Liang, Yue Ruifeng, Liu Litian *et al.*. Influence of thermal environment on electrical properties of micromachined polysilicon thin film resistor[J]. *Research and Progress of Solid State Electronics*, 2003, **23**(4): 509~513
董 良, 岳瑞峰, 刘理天等. 热环境对微机械多晶硅膜电阻电特性的影响[J]. *固体电子学研究进展*, 2003, **23**(4): 509~513
- 13 Tao Wenquan. Heat Transfer Theory [M]. XiAn: Press of Northwestern Polytechnical University, 2006. 320~326
陶文铨. 传热学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 320~326
- 14 Ji Xinming, Wu Feidie, Wang Jianye *et al.*. Study on modulation characteristic of micro-electromechanical system infrared radiation source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1098~1101
吴飞蝶, 纪新明, 王建业等. 微机电系统红外脉冲光源调制特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1098~1101
- 15 U. Bogli, R. Pleisch. Photoakustik: eine gas analysemethode im vergleich [J]. *Gaz, Wasser, Abwasser*, 1988, **68**(4): 192~196