

红外微辐射元的研制

李守荣¹⁾ 梁平治¹⁾ 屈新萍²⁾

¹⁾中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083;

²⁾复旦大学微电子系, 上海, 200433)

摘要 利用表面微机械加工技术, 研制出微桥结构红外微辐射元. 该辐射元是电阻阵列动态红外景象产生器的基本组成单元. 辐射元可以产生等效黑体辐射温度为 300~500K 的红外辐射, 能够满足中波、长波红外半实物仿真的需求.

关键词 红外微辐射元, 电阻阵列, 动态红外景象产生器, 半实物仿真.

DEVELOPMENT OF IR MICROEMITTER

LI Shou-Rong¹⁾ LIANG Ping-Zhi¹⁾ QU Xin-Ping²⁾

¹⁾ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²⁾ Department of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract IR microemitter with microbridge structure has been developed based on surface MEMS (Microelectromechanical Systems) technology. The microemitter is the key cell of resistor array dynamic IR scene generator. The microemitter generated IR radiation which the effective blackbody temperature is between 300K and 500K. It can meet the requirement of simulating MWIR (Medium Wave IR) and LWIR (Long Wave IR) radiation in hardware-in-the-loop simulation system.

Key words IR microemitter, resistor array, dynamic IR scene generator, hardware-in-the-loop simulation, MEMS.

引言

电阻阵列作为动态红外景象产生器自 80 年代开始研制以来, 发展非常迅速. 研制出的器件已在半实物仿真中得到广泛的应用. 例如, 在美国的 AM-COM 高级仿真中心, WISP (Wideband Infrared Scene Projector) 电阻阵列就被用来试验两种寻的器^[1], 使得 640×480 PtSi 和 512×512 InSb 器件得以成功应用. 在众多正在发展中的动态红外景象产生技术中, 电阻阵列由于具有低功耗、大动态范围、高分辨率、高帧频等优点成为当前最有发展前景的红外景象产生技术, 它的发展日益受到世界各国的重视.

电阻阵列的单元结构经历了从硅桥电阻、薄膜电阻到微桥电阻的发展历程. 其趋势是优化结构, 以提高单元在功耗、动态范围、占空比、帧频等方面的性能. 电阻阵列单元结构的前二种结构中, 硅桥电阻^[2]是电阻阵列的最早期结构, 其特点是以功耗为代价很容易实现高帧频, 但是, 由于它占空比低, 很难发展大的阵列从而限制了其发展. 薄膜电阻^[3]则

由于辐射和传导表面尺寸是等效的, 电阻产生的热一方面产生有效的红外辐射, 另一方面通过绝缘层流到硅衬底和衬底下的热沉. 虽然, 此结构很容易作成高占空比, 但由于象元与象元之间没有一定的隔离, 象元间的热串扰很明显, 从而影响了所产生图像的质量, 而且衬底散热是此结构的最大问题, 因此薄膜电阻的性能亦将受到限制. 而微桥结构的电阻微辐射元是由二条细长的“腿”支撑着的低热导率介质膜上淀积电阻材料构成, 并采用表面微机械加工技术将单元电路放在辐射元下面来实现占空比的提高. 低热导率的介质膜能够有效地降低单元功耗; 由二条细长的“腿”支撑着悬空的薄膜结构能够很好地实现单元间的热隔离; 将单元电路放在辐射元下面能够有效地提高占空比. 由于微桥结构的电阻微辐射元克服了前二种结构的不足, 能够实现高占空比、低功耗、无串扰等特点的高质量图像的产生. 所以, 微桥结构电阻阵列的发展备受关注. 本文中介绍了微桥结构的电阻微辐射元的工作原理, 制造工艺及测试结果.

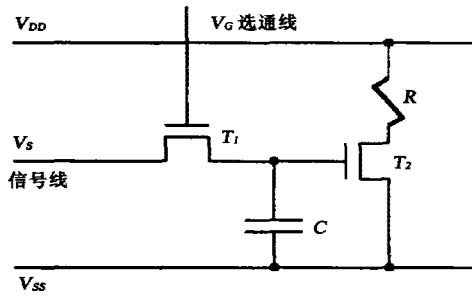


图 1 电阻阵列的工作原理图
Fig. 1 Schematic of resistor array

1 工作原理

微辐射元是电阻阵列的基本组成单元,图 1 是电阻阵列的工作原理图:一个发热电阻 R (微辐射元)和二一个 MOS 晶体管. T_1 为选通管,用做选通需要加热的微辐射元(电阻 R). T_2 为放大管,用来给电阻加热. 当选通有效时,信号 V_s 经 T_1 传输到 T_2 栅上, T_2 以相应的电流给电阻加热. 当选通无效时,存贮在电容 C 上的电荷经 T_1 的漏端缓慢放电,在放电时间内, T_2 可维持给电阻加热. 由于微辐射元的辐射是由电阻发热所引起,因此辐射的红外波段很宽,相当于灰体辐射. 依据 Plank 定理,辐射的能量大小由电阻的温度、占空因子和比辐射率决定. 当结构和材料一定时,占空因子和比辐射率是一定的,可以通过控制流过电阻的电流来控制电阻的温度,从而控制辐射能量的大小.

2 微辐射元的制造

微辐射元的主要制造工艺过程如下:(1)在硅基片中制备单元电路;(2)涂布聚酰亚胺,聚酰亚胺经亚胺化后作为牺牲层;(3)淀积氮化硅作为电阻的支撑材料;(4)溅射氮化钛作为发热电阻;(5)淀

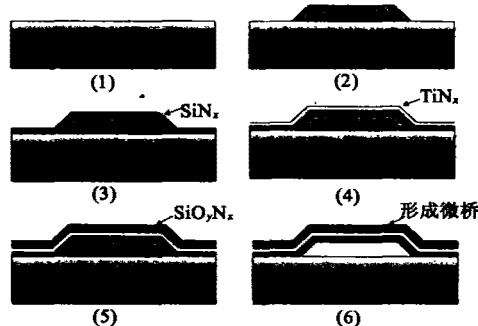


图 2 微辐射元的制造主要工艺流程
Fig. 2 Process flow of microemitter

积氮氧化硅薄膜作为应力平衡层;(6)去掉牺牲层,形成悬空的微桥.

在微辐射元的制造中,有以下三方面关键技术:

1. 牺牲层的选取. 牺牲层的选取对微桥结构的形成有着重要的影响. 通常采用 SiO_2 和聚酰亚胺两种材料. 去掉牺牲层时,前者采用 HF 酸湿法腐蚀且需一腐蚀加速层以利于横向腐蚀,该种腐蚀通常会对已形成的结构造成的一定的损坏. 与 SiO_2 相比,采用干法腐蚀的聚酰亚胺是较好的选择. 聚酰亚胺用氧等离子体进行各向同性刻蚀,不会对已形成的结构造成影响且工艺可操作性好.

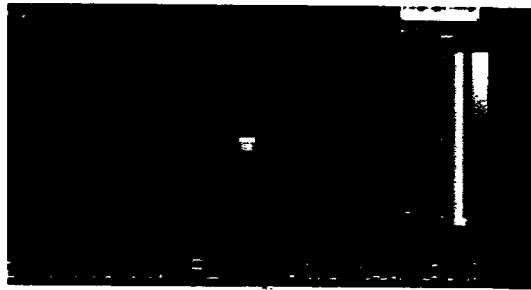
2. 电阻材料的选取. 电阻材料的选取是决定辐射元性能的关键. 制造微辐射元的电阻材料要满足以下要求:低的电阻温度系数(TCR);低的热导率;相对高的方块电阻;与硅工艺兼容. 目前研究得到的最成功的材料是 TiWN 和 TiN. 本制造工艺中选用氮化钛作为电阻材料,用反应离子束溅射方法能够得到电阻率合适的薄膜,在溅射过程中通过改变氮气的流量和调节腔体的总压力来改变薄膜的电阻率. 采用剥离工艺形成弯曲的条状电阻图形.

3. 氮氧化硅薄膜作为应力平衡层是微桥结构形成所不可缺少的关键工艺之一. 由于 PECVD 生长的氮化硅薄膜通常有较大的内应力,所以需要与其应力性质相反的氮氧化硅薄膜来平衡其应力. 实验证明,如果没有氮化硅薄膜的应力平衡作用,在去掉牺牲层后微桥会翘曲变形或在应力集中的边缘处出现断裂. 这样,器件制作就难以成功. 工艺流程中的(3)和(5)中的介质膜的厚度、折射率(不同的折射率薄膜的应力性质可能不同)^[4]等要综合考虑应力平衡和低热导、高辐射率等性能,通过调整各工艺参数来达到要求.

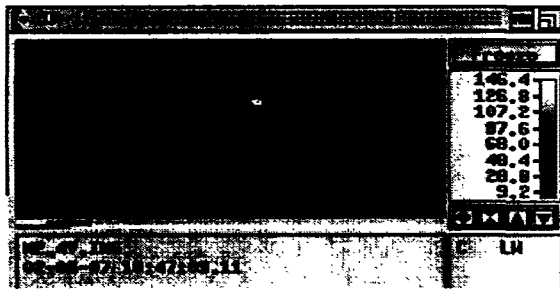
另外,为了减小功耗和减少衬底散热的负担,桥



图 3 微辐射元的扫描电子显微照片
Fig. 3 SEM photograph of microemitter



(a)



(b)

图4 (a) TVS-5500 型热成像系统拍摄到的微辐射元在所加电压为 1.8V 时的热图像(b) AGEMA900 测温热像仪拍摄到的微辐射元在所加电压为 4V 时的热图像

Fig.4 (a) Thermal image of the microemitter at the voltage of 1.8V from TVS-5500 (b) thermal image of the microemitter at the voltage of 4V from AGEMA900

腿和桥面的电阻应选择不同的材料. 微桥的具体结构参数可以根据工艺条件和要求而定. 图3为本文研制的微桥结构红外微辐射元扫描电子显微照片, 微桥下表面与衬底间隙约为 2 μm , 很好地实现了热隔离并且避免了不同象元间的热串扰.

3 测试结果与分析

由于红外微辐射元在 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 12 μm 波段的光谱辐射特性不同, 我们分别用 TVS-5500 型热成像系统和 AGEMA900 测温热像仪对辐射元的辐射特性进行了测试. TVS-5500 型热成像系统的光谱范围为 2 ~ 5.5 μm , AGEMA900 测温热像仪的光谱范围为 8 ~ 12 μm . 图4(a)和图4(b)分别用 TVS-5500 型热成像系统和 AGEMA900 测温热像仪拍摄到的微辐射元的热图像(微辐射元的电阻为 1510 Ω).

通常用等效黑体辐射温度 T_e 来表征微辐射元的红外辐射功率 Φ_e 的大小, 二者关系可以由式(1)和式(2)来描述

$$\Phi_e = \frac{\sigma}{\pi} \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (1)$$

$$T_e^4 = \varepsilon T^4 + (1 - \varepsilon) T_a^4 \varepsilon'. \quad (2)$$

其中 σ 为玻尔兹曼常数, ε 为发射率, T 为辐射元的实际温度, T_a 为环境温度, ε' 为环境的发射率.

由式(2)可以看出, 提高微辐射元的温度、发射率都可以提高红外辐射功率, 即提高了等效黑体辐射温度.

图5(a)和图5(b)分别为微辐射元在 2 ~ 5.5 μm 和 8 ~ 12 μm 波段的功耗与等效黑体辐射温度的关系曲线. 其中, 图5(a)是在真空中所测得的数据. 比较可以看出, 要达到相同的等效黑体辐射温度在不同波段下的功耗不相同. 其原因有二方面: 一. 由微辐射元的结构可知, 微辐射元的红外辐射主要是由电阻所加热的介质膜发热而产生的, 而在不同波段下介质膜的发射率不同^[5], 根据式(2), 相同的辐射元的实际温度, 发射率不同, 等效黑体辐射温度不同, 发射率高则等效黑体辐射温度高, 反之亦然. 二. 在真空中, 由于没有空气对流引起的能量损失, 电源提供的能量一方面直接转化为有效的热辐射,

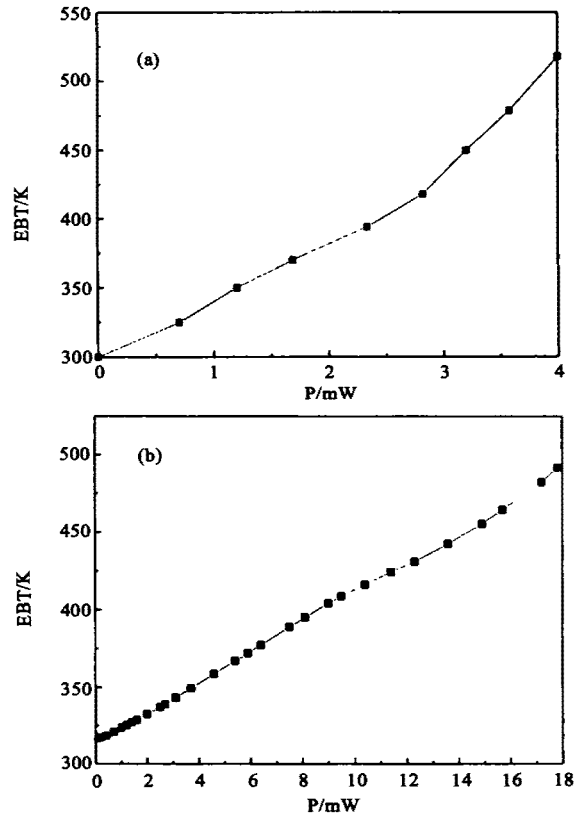


图5 (a) 2 ~ 5.5 μm 波段的功耗(P)与等效黑体辐射温度(EBT)的关系曲线, (b) 8 ~ 12 μm 波段的功耗与等效黑体辐射温度的关系曲线

Fig.5 (a) Power dissipation vs Effective Blackbody Temperature at waveband of 2 ~ 5.5 μm , (b) power dissipation vs Effective Blackbody Temperature at waveband of 8 ~ 12 μm

另一方面由热传导传到衬底损耗掉. 与在空气中相比器件少了一条热损耗途径, 要达到相同的温度所需要的功率就小. 因此, 器件在真空状态下工作有利于减小功耗.

由图 5 测试数据可以看出, 微辐射元等效黑体辐射温度范围在 $2 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段范围内均可达到 $300 \sim 500\text{K}$, 能够满足中波、长波红外半实物仿真的需求. 微桥结构的微辐射元单元功耗 (小于 20mW) 与其它结构的微辐射元 (如硅桥电阻的功耗为几百 mW) 相比较小, 适合于发展大的阵列.

4 结语

研制成功的微桥结构红外微辐射元可以产生相当于黑体 $300 \sim 500\text{K}$ 的红外辐射, 能够满足中波、长波红外半实物仿真的需求. 此微辐射元是电阻阵列动态红外景象产生器的基本组成单元, 它的成功研制为进一步研制更大阵列、更高性能的电阻阵列动态红外景象产生器打下了坚实的基础. 另外, 采用

表面微机械加工工艺和 IC 工艺相结合的微桥结构制造工艺方法, 可以为进一步研制微桥结构的同类器件, 如: 非制冷微测辐射热计 (Bolometer) 提供重要的工艺参考.

REFERENCES

- [1] Beasley D B, Saylor D A. Application of multiple IR projector technologies for AMCOM HWIL simulations. *SPIE*, 1999, **3967**: 223—230
- [2] Daehler M. Infrared display array. *SPIE*, 1987, **765**: 94—101
- [3] Lake S P, Pritchard A P, Sturland I M, *et al.* Description and performance of an electrically heated pixel IR scene generator. *SPIE*, 1991, **1486**: 286—293
- [4] ZHAO Yong-Jun, WANG Ming-Juan, YANG Yong-Jun, *et al.* Study of PECVD SiN thin film stress. *Chinese Journal of Semiconductors* (赵勇军, 王民娟, 杨拥军, 等. PECVD SiN 薄膜应力的研究. *半导体学报*), 1999, **20**(3): 183—187
- [5] Ravindra N M, Abedrabbo S, Wei C, *et al.* Temperature-dependent emissivity of silicon-related materials and structures. *IEEE Trans. Semicon. Manufacturing*, 1998, **11**(1): 30—38