

文章编号:1001-9014(2005)03-0227-04

基于 CMOS 工艺的横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结红外微测辐射热计

陈二柱, 梁平治

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:基于多晶硅 $p-n$ 结正向压降的温度特性,应用标准 CMOS 工艺,结合体硅微机械加工技术,研制成功非制冷红外微测辐射热计.本文详细分析了横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结的温度特性,给出了正向压降温度变化率的理论表达式和实验测量值;并描述了微测辐射热计的设计思路和制作工艺.实验结果表明:在室温(284~253K)附近,横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结正向压降的温度变化率为 1.5mV/K;在 3~5 μm 红外波段,微测辐射热计的电压响应率为 $5.7 \times 10^3 \text{ V/W}$,黑体探测率 D^* 为 $1.2 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

关键词:微测辐射热计, 横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结, 温度变化率, CMOS 工艺

中图分类号:TN4 **文献标识码:**A

INFRARED MICROBOLOMETER OF LATERAL POLYSILICON $p^+p^-n^+$ JUNCTION BASED ON STANDARD CMOS PROCESSES

CHEN Er-Zhu, LIANG Ping-Zhi

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

Abstract:By using standard CMOS processes and bulk micromaching technology, a uncooled infrared microbolometer detector based on the temperature character of the lateral polysilicon $p^+p^-n^+$ junction was developed. The temperature characteristic of the polysilicon $p^+p^-n^+$ junction's forward bias were analyzed in detail. The theoretic expression and experimental data of the temperature rate of change of forward voltage drop were presented. The design ideas and fabrication processes were given. The temperature coefficient of the forward voltage at a constant current is 1.5mV/K at various temperatures in the range of 284K to 253K. The responsivity and detectivity (D^*) are $5.7 \times 10^3 \text{ V/W}$ and $1.2 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ in 3~5 μm IR radiation band, respectively.

Key words:microbolometer; lateral polysilicon $p^+p^-n^+$ junction; temperature rate of change; CMOS process

引言

在过去十几年里,非制冷红外焦平面探测器在许多领域得到了广泛的应用^[1],主要包括微测辐射热计、热释电探测器和热电堆 3 种,由于微测辐射热计的响应率远高于热电堆,在制作上较热释电探测器容易,而且易于跟 CMOS 读出电路集成,所以微测辐射热计受到了各国的高度重视.

目前研制开发的微测辐射热计中,有热敏电阻型和 $p-n$ 结型.通常热敏电阻微测辐射热计采用表面微机械工艺制作的微桥结构.虽然普遍使用的氧化钒热敏薄膜具有 $-2 \sim -3\% \text{ K}^{-1}$ 的电阻温度系

数,但并不是 IC 工艺所使用的标准材料,所以这种薄膜材料制作的探测器成本较高.日本三菱公司于 1999 年研制出单晶硅 $p-n$ 结微测辐射热计,这种设计新颖的探测器是应用 SOI 材料研制开发的^[2].然而目前 SOI 材料的 CMOS 工艺并不普遍,所以这种探测器的成本难以降低.为了研制低成本的非制冷红外焦平面,我们提出采用多晶硅 $p-n$ 结作为热敏元的微测辐射热计研制方案:首先采用标准的 CMOS 工艺制作横向多晶硅 $p^+p^-n^+$ 结和读出电路,再辅以体硅微机械加工技术制作微桥形式的热绝缘结构-微测辐射热计;由于在 CMOS 工艺完成后,不需要任何光刻和淀积等工艺,所以其成本仅相

收稿日期:2004-06-30,修回日期:2005-01-29

Received date: 2004-06-30, revised date: 2005-01-29

作者简介:陈二柱(1972-),男,陕西榆林人,中国科学院上海技术物理研究所博士生,主要从事非制冷红外焦平面的研究.

当于加工 CMOS 读出电路的费用。

1 多晶硅 p-n 结正向电压的温度特性

在恒定偏置电流条件下,单晶硅 p-n 结的正向压降与结温呈现线性变化;利用这一温度特性,制作的温度传感器已经得到广泛的应用.对于多晶硅 p-n 结来说,也具有与单晶硅 p-n 结相似的温度特性^[3]. Greve^[4] 和 Abdelbaki^[5] 等人研究表明,多晶硅 pn 结的正、反向电流主要是由空间电荷区内的复合和产生电流构成,这点不同与单晶硅 pn 结二极管。

在多晶硅 p-n 结的空间电荷区内,陷阱发射和俘获电子强烈依赖于电场强度,根据 Greve^[4] 和 Abdelbaki^[5] 等人提出的多晶硅 p-n 结电流 - 电压理论模型和数值分析模型,正向电流 - 电压关系可具体表示为:

$$I_{FR} = \frac{1}{2} A q N_i q V_F \sigma v_{th} n_i \frac{W_F}{L} e^{\left(\frac{qV_F}{2k_0T}\right)} e^{\left(\frac{F_m}{F_0}\right)^n} \quad (1)$$

其中: A 为 p-n 结截面积, k_0 为玻耳兹曼常数; q 为电子的电荷电量, F_m 为 p-n 结内最大电场强度; N_i 为多晶硅晶粒间界陷阱态浓度; n_i 为本征载流子浓度, σ 为载流子复合中心的有效俘获截面; $v_{th} = \sqrt{3k_0T/m^*}$ 是载流子热运动速度, m^* 为载流子有效质量, L 为晶粒长度; F_0 和 n 为拟合参数; W_F 是空间电荷区的载流子有效复合宽度。

忽略温度对拟合参数 F_0 和 n 的影响,同时忽略微小正向压降变化对空间电荷区载流子有效复合宽度 W_F 和 p-n 结内最大电场 F_m 的影响,则在固定正向偏流 I_{FR} 不变的情况下,正向压降 V_F 随温度的变化率可表示为:

$$\frac{dV_F}{dT} \Big|_{I_{FR}=\text{常数}} = \frac{V_F q V_F - E_g - 4k_0T + T \frac{dE_g}{dT}}{2k_0T + qV_F} \quad (2)$$

由上式可知,在正向偏置电流一定的情况下,正向压降的温度变化率是温度和正向电压的函数;这样在某一温度附近,正向压降的温度变化率可近似认为是正向电压的函数.根据上式,在一定温度下,可以得到正向电压的温度变化率与正向电压的关系曲线,如图 1 所示.由图可以看出,在正向电压在 0.2V 附近,其温度变化率最大,高达 2.5mV/K,并随着正向电压的进一步增大,温度变化率而单调减小。

由以上分析可知,应用多晶硅 p-n 结正向压降随温度变化的特性,同样可以作为温度传感器或热敏型红外探测器.图 2 给出了横向多晶硅 p⁺p⁻n⁺ 结在正向电流为 1μA 时,正向压降在室温附近随温

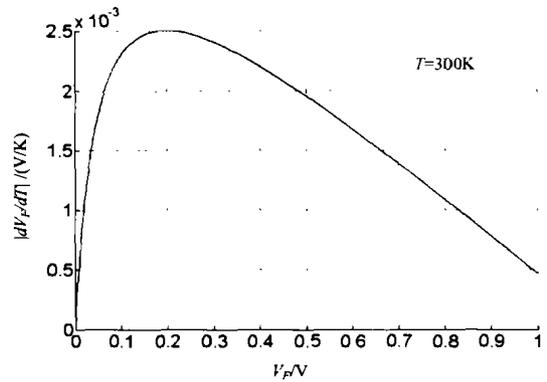


图 1 正向压降的温度变化率与正向压降的理论关系曲线

Fig. 1 The theory curve between the temperature coefficient of forward voltage and forward bias

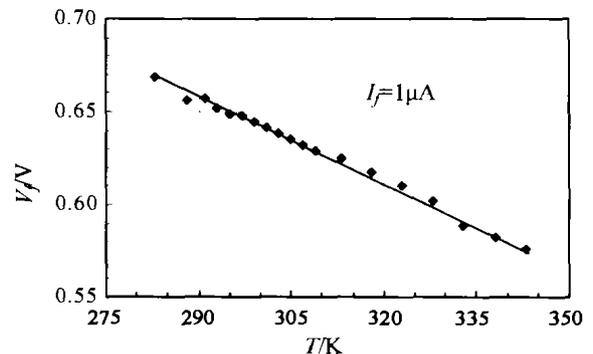


图 2 恒定电流下横向多晶硅 pn 结正向压降随温度变化的关系曲线

Fig. 2 The forward voltage drop vs temperature of the lateral polysilicon PN junction at a current constant

度变化的实验测量值,这表明 p⁺p⁻n⁺ 结的正向压降随温度增加而单调减少,具有负的温度系数,在室温附近约为 -1.5mV/K。

单个 p⁺p⁻n⁺ 结正向压降的温度系数比较小,如果将多个 p-n 结串联,则在正向电流恒定的偏置条件下,同时忽略 p⁺p⁻n⁺ 结间连线的电阻,其两终端间正向电压的温度变化率应该随 p⁺p⁻n⁺ 结串联个数的增多而成比例地增大.这样在相同温度变化情况下,就可以得到较大的正向电压变化量.图 3. 给出在室温 300K 的环境下,多个串联 p⁺p⁻n⁺ 结的正向压降的温度变化率值,由图可看出,串联 p⁺p⁻n⁺ 结两端电压的温度变化率与 p⁺p⁻n⁺ 结的数量成正比。

2 微测辐射热计的制作

利用标准 CMOS 工艺,再结合微机械加工技术,可以制作各种微机械(MEMS)器件,而且已得到相

当广泛的应用^[6]. 为了研制低成本、高分辨率的非制冷微测辐射热计焦平面,我们设计了基于标准 CMOS 工艺的横向多晶硅 p⁺p⁻n⁺ 结微测辐射热计研制方案,并成功地制造出多种结构微测辐射热计单元器件.

在非制冷微测辐射热计的设计中,热敏元与衬底间的热绝缘结构是关键,而在微桥形式的热绝缘结构中,热敏元支撑臂的热传导是主要的散热途径,所以要尽量减小支撑臂的热导,以增大探测器的响应率;但是支撑臂又是热敏元与读出电路间电学互联的通道,所以支撑臂既要热导小又要导电性好,同时还要有一定的机械强度. 对于整个热绝缘结构来说,还要同时考虑微桥的热容量、红外吸收率等问题.

在综合考虑上述以因素后,并权衡多晶硅和金属铝的电学与热学性能后,支撑臂选用低阻多晶硅作为热敏元与读出电路间的连线. 在 CMOS 工艺加工中,利用高阻多晶硅和 MOS 管源、漏离子注入制作横向多晶硅 p⁺p⁻n⁺ 结,作为温度传感器;为了使微测辐射热计有较高的响应率,用铝将多个多晶硅 p⁺p⁻n⁺ 结相串联,以增大其两端正向压降的温度变化率. 最外层用氮化硅钝化层覆盖,以提高热敏元的红外吸收效率. 在 CMOS 加工的最后一次光刻工艺中,刻出腐蚀孔,为后序腐蚀露出了硅衬底. CMOS 工艺加工完成后,得到图 4(a)所示的结构单元,微桥形式的热敏元已经与周围的读出电路相分离. 然后采用与 CMOS 工艺相兼容的四甲基氢氧化铵 (TMAH) 各向异性腐蚀液,前端腐蚀硅衬底,将微桥形式的热绝缘结构架空,从而得到图 4(b)所示的测辐射热计,热敏元和支撑臂已完全架空. 这样,在 CMOS 工艺完成后,仅仅需要一次湿法腐蚀工艺,就可以制成微测辐射热计.

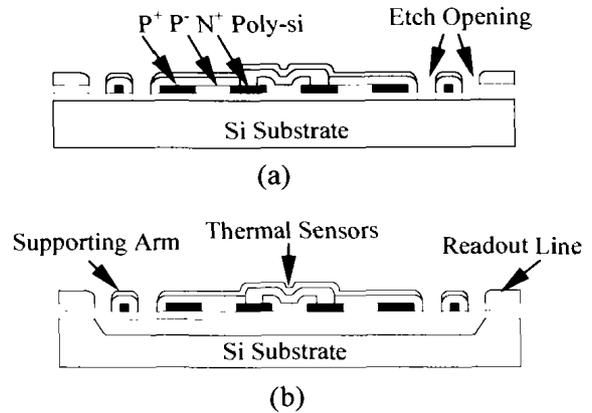


图 4 CMOS 工艺加工后 (a) 和 TMAH 腐蚀后 (b) 的微桥结构示意图
Fig. 4 The schematics of microbridge structure after (a) COMS process and (b) TMAH etching

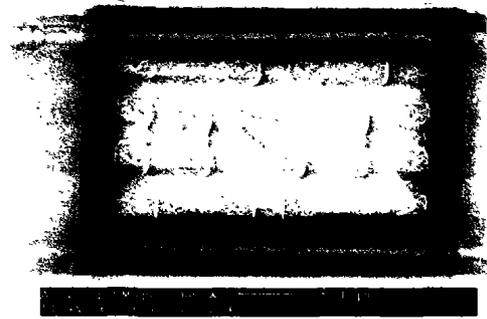


图 5 微测辐射热计的扫描电子显微镜照片
Fig. 5 The SEM graph of the microbolometer

图 5 是最终得到的微测辐射热计扫描电子显微镜照片,单元尺寸为 $42 \times 42 \mu\text{m}^2$. 照片清晰可见桥面上多个相串联的横向多晶硅 p⁺p⁻n⁺ 结,桥面和支撑臂几乎没有扭曲、变形,而且桥面比较平展,说明应用 CMOS 工艺加工的多层薄膜,其应力可以得到较好的平衡.

3 测试结果与分析

在室温下,我们对器件的黑体响应率、噪声电压和响应信号电压值与调制频率的变化关系进行了测量. 探测器在真空度为 1Pa、温度为 295K 的环境下工作,测量时器件的恒定偏值电流为 $1 \mu\text{A}$,偏值电流由三极管镜像电流源提供和控制. 黑体响应信号和噪声电压采用 EG&G PARC 系统测量,该系统可进行选频和锁相两种方式测量. 图 6 所示是测试系统的原理图,其中三极管 T₀ 和 T₁ 型号: C9014, R₀ = 100kΩ.

具体测试条件为:黑体温度为 1000K,调制频率为 10Hz,噪声测量的带宽为 0.16Hz,光谱响应波段

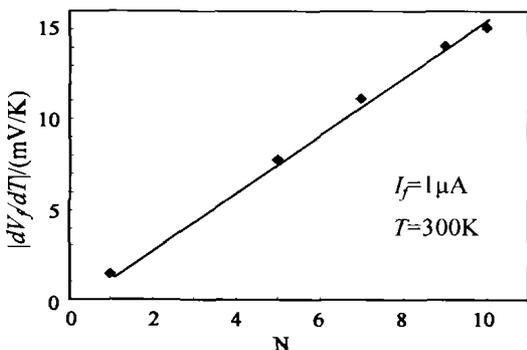


图 3 恒定电流下串联 pn 结的正向压降与 pn 结数量的关系曲线
Fig. 3 The forward bias vs temperature of the series polysilicon PN junction at a current constant

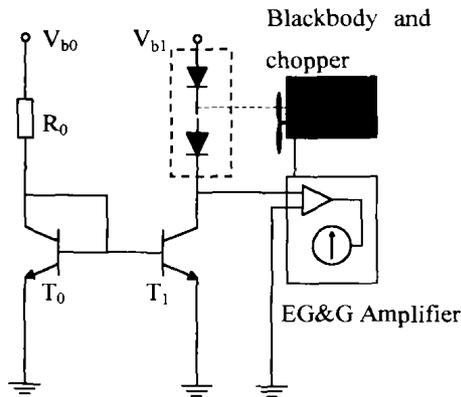


图6 测试系统原理图
Fig. 6 The schematics of the measurement system

为: $3 \sim 5 \mu\text{m}$. 响应率的测量采用锁相方式, 外触发信号由调制盘控制器提供. 噪声电压测量采用选频方式, 测量带宽由选频旋钮和调 Q 旋钮来选择.

利用信号电压频谱法^[7], 通过测量探测器响应信号电压与调制频率间的变化关系, 可以得到探测器的有效热时间常数和有效热导. 响应信号电压与调制频率的关系可表示为:

$$v_s = \frac{\beta\eta\Phi_w}{G_{\text{eff}}(1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{\text{eff}}^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

其中, v_s 为响应信号电压, Φ_w 为黑体辐射能量, β 为探测器正向压降的温度变化率, η 为探测器在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的吸收率, G_{eff} 为器件有效热导, τ_{eff} 为器件的有效热时间常数, f 为调制频率. (1) 当 $2\pi f\tau_{\text{eff}} \ll 1$ 时, 式(3)可表示为

$$v_s = \frac{\beta\eta\Phi_w}{G_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

这样当调制频率较低时, 可以通过式(4)得到器件的有效热导.

(2) 当 $2\pi f\tau_{\text{eff}} = 1$ 时, 即 $f = 1/2\pi\tau_{\text{eff}}$, 式(3)可表

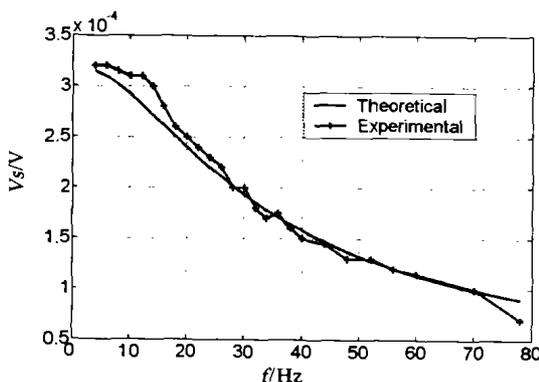


图7 响应信号电压与调制频率间的实验曲线和理论拟合结果
Fig. 7 The experimental curve and theoretical fitting of response signal voltage vs modulation frequency

示为

$$v_s = \frac{\beta\eta\Phi_w}{\sqrt{2}G_{\text{eff}}}, \quad (5)$$

此时的响应信号电压为低频时响应信号电压的 -3dB , 由此可以得到器件的有效热时间常数 $\tau_{\text{eff}} = 1/2\pi f_{-3\text{dB}}$.

根据式(4)和式(5)表达式, 通过与实验数据拟合 (如图7. 所示), 得到了测辐射热计的有效热时间常数和有效热导, 其值分别约为 7ms 和 $7.9 \times 10^{-7} \text{W/K}$.

通过测量和计算, 微测辐射热计的电压响应率分别为 $5.7 \times 10^3 \text{V/W}$, 探测率 D^* 为 $1.2 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

4 结论

应用标准 CMOS 工艺和体硅微机械加工技术, 成功研制出非制冷微测辐射热计单元, 其两端电压的温度变化率为 -15mV/K , 有效热时间常数为 7ms , 电压响应率为 $5.7 \times 10^3 \text{V/W}$, 黑体探测率 D^* 达 $1.2 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. 微测辐射热计单元的研制成功, 为我们研制大规模、低成本的红红外微测辐射热计焦平面打下了坚实的基础.

REFERENCES

- [1] HE Yu-Qing, JIN Wei-Qi, GAO Zhi-Yun, et al. Analysis of modulating chop used in pyroelectric uncooled FPA thermal imaging—chopper's exposure efficiency [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何玉青, 金伟其, 高雅允, 等. 热释电非制冷焦平面热像仪调制斩波器的分析——斩波器的曝光效率. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(4): 247—250.
- [2] Ishikawa T, Ueno M, Nakaki Y, et al. Performance of 320×240 uncooled IRFPA with SOI diode detectors [J]. *SPIE*, 2000, **4130**: 1—8.
- [3] Sooraj Karnik V, Miltiadis Hatalis K. Multiple Lateral polysilicon diodes as temperature sensors for chemical microre-creation systems [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(3): 1200—1205.
- [4] Greve D, Potyraj P, Guaman A. Field-enhanced emission and capture in polysilicon pn junctions [J]. *Solid-State Electronics*. 1985, **28**(12): 1255—1261.
- [5] Aziz A, Bonnaud O, Lhermite H. Lateral polysilicon pn diodes: current-voltage characteristics simulation between 200K and 400K using a numerical approach [J]. *IEEE Trans. On Elec. Dev.*, 1994, **41**(2): 204—211.
- [6] Guillou D F, Santhanam S, Carley L R. Laminated, Sacrificial-poly MEMS technology in standard CMOS [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, **85**: 346—355.
- [7] LIU Xi-Ding, LIANG Ping-Zhi, SHEN Xue-Chu. Analysis of bias heating effect in uncooled infrared microbolometer and determination of its main parameters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘西钉, 梁平治, 沈学础. 非制冷红外微测辐射热计的自热效应分析及重要参数测定. *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(1): 37—40.