

微测辐射热计器件工艺开发和特性评估

刘 伟, 何 兵, 马 特, 刘 刚

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 依托半导体生产线开发了基于 MEMS 微桥结构的微测辐射热计 (micro-bolometer) 器件, 其中, 使用化学气相沉积 (CVD) 技术开发了非晶硅 (α -Si) 薄膜工艺, 并将其用作微测辐射热计器件的敏感层材料, 该材料在 1000 Å 厚度下的膜厚均匀性可以控制在 2% 以内 (1-sigma, within wafer), 电阻均匀性可以控制在 2% 以内 (1-sigma, within wafer), 其室温下的电阻温度系数 (TCR) 可以达到 -2.5% 左右; 采用先刻沟槽工艺技术开发了 MEMS 微桥结构的接触模块, 以无支撑柱结构实现了其支撑和电连接结构; 使用 Ti/TiN 薄金属薄膜作为电极层, 并利用电极层图形实现该敏感层电阻器件的电连接和图形定义; 开发了高性能敏感层电阻工艺技术, 实现了对敏感层材料工艺损失和电极层侧面腐蚀的良好工艺控制。在完成微测辐射热计器件工艺开发后, 对其进行了器件级测试和评估, 结果表明: 该器件室温电阻值在 250 kΩ 左右, 且具有优异的欧姆接触特性; 室温下器件级 TCR 在 -2% 左右, 略低于非晶硅薄膜材料 TCR 的测试值; 同时, 对该器件进行的升温和降温测试结果表明, 文中开发的敏感层材料没有滞回效应。最后, 对该器件进行释放工艺处理形成悬空的 MEMS 微桥结构, 经扫描电镜 (SEM) 和光学显微镜测试评估, 其微桥表面呈现良好的平坦度和均匀性, 能够很好地满足微测辐射热计及相应的非制冷红外探测器产品的技术需求。

关键词: 微测辐射热计; MEMS; 微桥结构; 敏感层

中图分类号: TN376; TN305 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220279

Process development and characteristic evaluation of micro-bolometer device

Liu Wei, He Bing, Ma Te, Liu Gang

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on MEMS micro-bridge structure, micro-bolometer device was developed on standard semiconductor production line. Chemical Vapor Deposition (CVD) technology was used to deposit amorphous silicon (α -Si) film as sensing material. The within wafer thickness uniformity and the resistance uniformity of 1000 Å α -Si film can be controlled to be less than 2%, and the Temperature Coefficient of Resistance (TCR) of 1000 Å α -Si film can reach at about -2.5%. Contact module of MEMS micro-bridge structure was developed by trench first approach, and electrical connection between MEMS and readout circuit was achieved by thin electrode layer on sidewall and bottom of the anchor and contact structure. Ti/TiN thin metal layer was used as electrode layer, and sensing resistor device was defined by the electrode layer patterns. Sensing material resistor device was fabricated by optimized integration scheme, which can achieve better process control on the sensing material loss and

收稿日期: 2022-04-24; 修订日期: 2022-05-30

基金项目: 西安市英才计划 (XAYC200025)

作者简介: 刘伟, 男, 博士生, 主要从事红外成像与测量技术等方面的研究。

导师简介: 刘刚, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间控制工程与技术等方面的研究。

electrical layer sidewall recess etch amount. After device fabrication, room temperature resistance of device was about 250 k Ω with good ohmic contact. Device level TCR was measured at about -2%, and slightly lower than the data of thin film on blanket wafer. And the resistance data during the temperature raising up and down indicated that there was no hysteresis effect. Finally the MEMS device was released, and the optical and SEM data showed good physical performance, which can match the technical requirements of micro-bolometer production.

Key words: micro-bolometer; MEMS; micro-bridge; sensing material layer

0 引言

非制冷红外探测器是红外探测器产品的一类,因成本和性能等优势,被广泛地应用到电力检测、监控、测温、智能建筑、医疗等领域。非制冷红外探测可以通过多种技术实现,包括热电偶、热释电、微测辐射热计等。其中,微测辐射热计因其灵敏度高、像素单元小、可实现大规模面阵等特点,成为热点技术^[1-5]。

基于微测辐射热计(micro-bolometer)技术的非制冷红外热成像探测器技术起源于 20 世纪 70~80 年代,在美国军方资助下由 Honeywell 和 Texas Instruments (TI) 等公司分别开发出相关技术^[6-9];其中, Honeywell 开发了基于 VO_x 材料的微测辐射热计,而 TI 则开发出基于热释电效应的钛酸钡锶 (BST) 材料的微测辐射热计。由于 BST 材料和相关技术很难被小型化和低成本化,因此该技术逐渐淡出市场。而基于 VO_x 的红外成像探测器成为主流技术,相关从业公司包括欧洲、美国、日本等多家公司,如 FLIR、Raytheon、NEC 等。同期, TI、法国 CEA-LETI 等公司及研究所开始着手研究和开发基于非晶硅材料的微测辐射热计技术,并由 L-3 和 ULIS 等公司将其实现量产,该技术也逐渐发展成为与 VO_x 技术并行的主流微测辐射热计技术^[10-13]。

可以看出,业界用于红外成像的微测辐射热计主流技术有两种,分别是基于 VO_x 和非晶硅的 micro-bolometer 技术。由于 VO_x 材料涉及金属钒,该材料会造成半导体代工厂严重的金属沾污风险,故该材料与半导体标准生产线的兼容性较差。而非晶硅材料可以利用标准半导体生产线的设备实现,且不存在任何沾污问题,具备与半导体工艺生产线完全兼容的优势。

随着微加工技术的发展,基于 MEMS 微桥结构技术制造的微测辐射热计器件,具备与半导体读出电路单芯片集成并实现大规模生产的能力,逐渐成为非制冷红外探测器的主流制造技术^[14-16]。然而业界的

从业者主要是使用半导体工厂实现读取电路的生产,而以专用 MEMS 工厂来实现该产品 MEMS 部分的生产。由于专用 MEMS 生产线的生产规模小、专用设备功能单一、且无法应用不断发展的先进半导体工艺技术,再加上其高额运营成本必然导致芯片成本居高不下且产能有限,是制约该产品市场进一步拓展的关键因素。

为解决上述问题,文中基于半导体生产线设备,以单芯片集成方案为目标,开发了基于 MEMS 微桥结构和非晶硅敏感材料的微测辐射热计器件,对其关键结构的物理形貌、电学等特性进行了测试和评估,并对该产品量产技术可行性进行了评估。

1 微测辐射热计工作原理

根据黑体辐射理论,任何温度处于绝对零度以上的物体,都会向外辐射连续波段的电磁波,且辐射出的电磁波在各个波段的能量不同,其峰值对应的波段与该物体的温度相关。在常温 300 K 下,常规黑体辐射的电磁波能量与波长的关系符合维恩位移定律(Wien's Displacement Law),即其能量辐射峰值波长与温度的关系为 $\lambda=2898/T$ ^[17-18]。可以看到常温下物体辐射的电磁波的能量主要集中的 10 μm 左右的波段,也即是中长波红外线波段,该波段的电磁波是探测常温下物体温度的最佳波段。同时,物体辐射出的电磁波需要在空气中传播才能到传感器端进行探测,由于空气中存在水蒸气、氧气、氮气、二氧化碳等气体,考虑气体对红外辐射波段光线的吸收,一般会选择损失较低的固定波段红外信号进行检测,如 3~5 μm 或者 8~14 μm 等。而 8~14 μm 恰恰是常温物体探测的最佳波段,所以常规红外传感器所探测的波段为 8~14 μm 的长波红外^[17-19]。

微测辐射热计是一种热探测器,其探测单元在吸收红外辐射后将其转换为热,并引起微桥表面温度发

生变化,导致微桥表面的热敏电阻薄膜电学特性发生变化,从而将红外辐射信号转换成电信号以实现物体温度的探测。图 1 是典型微测辐射热计器件示意图,可以看到该器件的核心是一个悬空的微桥结构,由两个支撑和电连接结构通过梁结构将微桥支撑起来,并与衬底分隔开以减小热传导损失。这样,当该结构吸收红外辐射后,微桥表面的温度升高,其温度变化量与吸收辐射能量成正比,并通过热敏电阻材料将其转换成的电信号来测量。该热敏电阻薄膜材料的电阻温度系数 (TCR) 决定着单位温度变化引起的电阻变化量,并最终决定着该微测辐射热计器件的灵敏度。

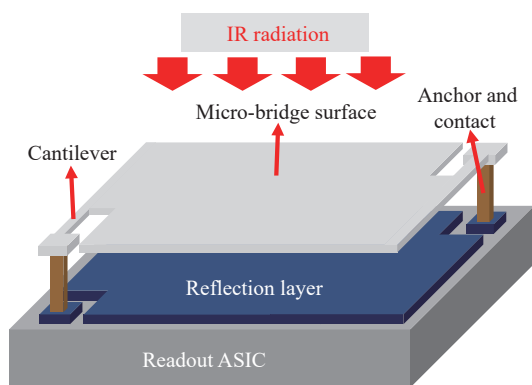


图 1 典型微测辐射热计器件结构示意图

Fig.1 Schematic of micro-bolometer structure view

2 实验方案

文中将重点研究如何采用与半导体工艺兼容的技术方案,在标准半导体产线上开发并实现基于 MEMS 微桥结构的微测辐射热计器件,并验证其 ASIC-MEMS 单芯片集成方案的可行性。文中研究的关键技术环节包括:利用半导体工艺技术实现 ASIC 读取电路的制造,并在 ASIC 读取电路硅片之上,利用顶层金属层实现金属反射层、着陆金属、PAD 和硅片表面平坦化等结构和功能;开发与半导体工艺兼容的 MEMS 工艺,实现基于 MEMS 微桥结构的微测辐射热计器件,并评估其工艺、结构和器件等性能,以及 ASIC-MEMS 单芯片集成的可行性。文中基于 MEMS 微桥结构的微测辐射热计器件截面结构示意图见图 2。

如图 2 所示,可以看到, MEMS 微桥结构是该器件的核心结构,其中关键膜层工艺实验方案如下:
(1) 基于顶层金属工艺开发和实现金属反射层、着陆

金属和 PAD 层,该部分是利用改进的半导体顶层金属工艺实现的,其叠层材料为 Ti/TiN/Al,其叠层厚度约为 4500 Å (1Å=10⁻¹⁰ m) 左右;(2) 利用化学气相沉积工艺技术,开发厚度为 1000 Å 左右的低温低应力非晶硅工艺,将其设置在微桥表面,用于形成敏感层电阻;(3) 开发低应力薄金属电极层工艺,在保证微桥整体应力平衡的基础上,实现敏感层电阻电学信号的引出;(4) 利用 CVD 技术开发低应力氮化硅薄膜,将其设置在敏感层电阻上方,用于增强整个结构的机械支撑;利用 CVD 技术开发低应力 SiO₂ 薄膜,将其设置在敏感层电阻下方,同时设置在氮化硅上方,用于释放对整个微桥结构的保护作用。

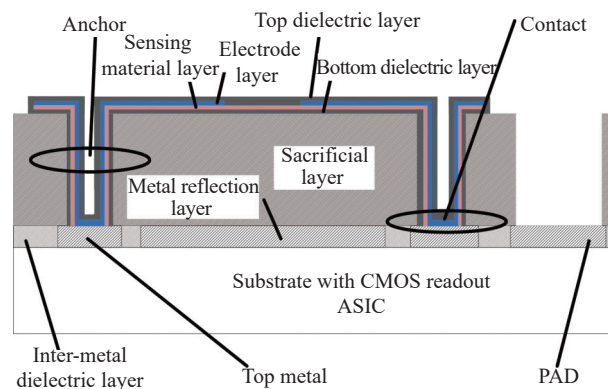


图 2 与半导体工艺兼容的微辐射热计器件截面示意图

Fig.2 Schematic of infrared micro-bolometer structure

该结构中,支撑和电连接模块是实现微桥支撑和电信号引出的关键,该模块位于牺牲层内,包括支撑孔及其底部的接触孔两部分。综合考虑工艺复杂性、成本和可靠性等因素,文中采用了沟槽优先的集成方案,即先在牺牲层内光刻刻蚀形成支撑孔,再沉积释放保护层和敏感层,然后在支撑孔底部光刻刻蚀形成接触孔,最后沉积金属电极形成电连接,而不再设置金属塞或者介质塞结构,可以大大降低工艺复杂度和成本。

完成微测辐射热计器件开发后,文中对其关键工艺、结构和器件的物理形貌、电学特性以及释放后的悬空 MEMS 微桥结构进行了测试和分析,以评估其是否满足单芯片集成产品的量产技术需求。

3 结果与分析

文中将 MEMS 微桥结构直接构建在半导体工艺

制造的 ASIC 读取电路硅片互连层次之上, 能够与 ASIC 读取电路芯片共享衬底面积, 具有集成度高、低成本、低寄生、高性能等优势。然而 MEMS 工艺会引入较厚的叠层薄膜和较大的硅片表面高低起伏, 这将导致硅片翘曲、CD/overlay 超标、光刻胶残留、寄生电阻等问题, 也会影响到电学接触等特性, 同时, 整个 MEMS 微桥结构各工艺模块相互关联, 并直接影响到微测辐射热计器件特性以及悬空 MEMS 微桥结构的平坦度等。下面将就 MEMS 微桥结构各关键技术进行重点研究, 找出匹配最佳器件特性的技术方案。

3.1 敏感层材料开发

敏感层材料是微测辐射热计器件的核心技术。文中基于半导体 CVD 工艺技术开发了低温低应力非晶硅薄膜做为敏感层材料, 将薄膜沉积温度控制在 380 °C, 以避免对前面工艺和器件产生影响, 并将该薄膜应力控制在 ± 100 MPa, 以保证释放后悬空 MEMS 微桥结构的平坦度。

非晶硅敏感层薄膜膜厚均匀性对量产产品非常关键。通过压力、温度、气体流量及比例等工艺条件的优化, 以厚度 1000 Å 为研发目标, 文中开发的非晶硅薄膜经过 49 点膜厚测试后, 其膜厚均匀性 (1-sigma 除以均值) 可以达到 $\sim 1.06\%$, 膜厚 Mean 值为 989.8 Å, 最大值为 1005 Å, 最小值为 969.3 Å, Range 为 35.7 Å; 该特性能够很好地满足产品性能和良率等指标对敏感层厚度均匀性的要求。

根据微测辐射热计器件原理可知, 敏感层电阻均匀性直接影响到非均匀性输出等关键电学性能, 对产品良率起到至关重要的作用。通过对温度、反应气体比例等工艺条件的优化, 文中非晶硅薄膜电阻均匀性可以控制在 2% 以内 (如图 3 所示), 能够很好地满足读取电路对电阻均匀性的要求。

敏感层材料的电阻温度系数 TCR 是微测辐射热计器件的核心参数, 直接影响产品的灵敏度等性能。经工艺优化以及对均匀性、应力等工艺性能的综合考量, 最终得到优化的非晶硅敏感层薄膜 TCR, 如图 4 所示, 其室温下 TCR 约为 -2.5% , 与业界相关报告相当^[20], 能够很好地满足产品性能要求。

低温 CVD 非晶硅薄膜工艺由于温度低反应气体分解不充分等原因, 其颗粒往往较多, 同时, 非晶硅与其他薄膜的黏附性较差, 很容易出现剥落等问题。经

过工艺优化, 使用颗粒扫描仪进行测试, 以大于 0.2 μm 尺寸计算, 文中开发的非晶硅薄膜颗粒数可以控制在 10 颗以内, 如图 5 所示。

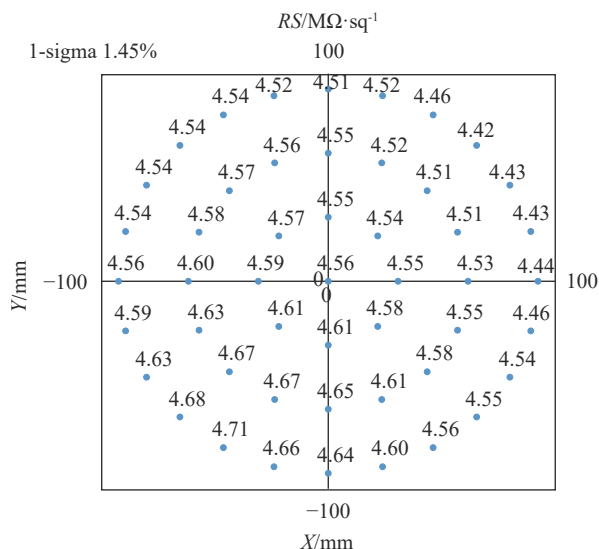


图 3 1000 Å 非晶硅薄膜片内 RS 分布图

Fig.3 RS distribution map of 1000 Å α -Si thin film

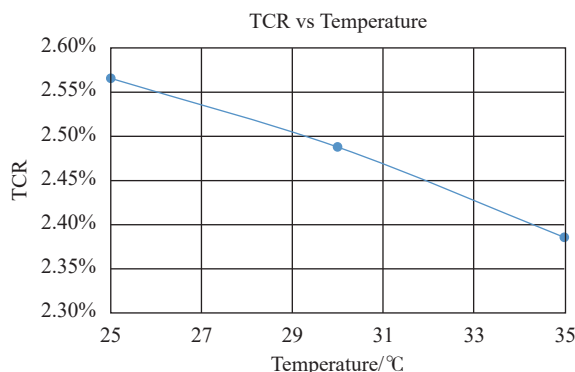


图 4 1000 Å 非晶硅薄膜 TCR 与温度的关系图

Fig.4 Relationship of TCR with temperature of 1000Å α -Si thin film

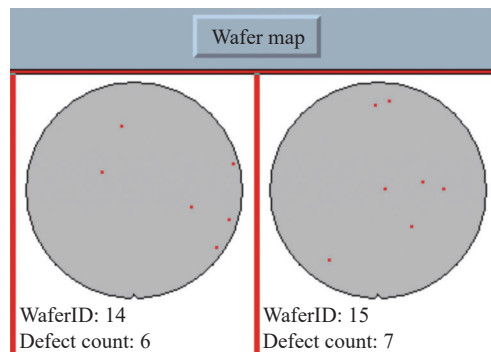


图 5 1000 Å 非晶硅薄膜颗粒数扫描图

Fig.5 Particle map of 1000 Å α -Si thin film

3.2 硅片表面平坦化及支撑与电连接结构开发

在 ASIC 完成后, 硅片表面起伏较大, 需要引入平坦化工艺实现其平坦化。该方案在 ASIC 完成后, 通过引入顶层通孔 (Top via) 及对应的化学机械抛光工艺, 实现表面平坦化, 见图 6 的“Surface after Planarization”位置, 然后在进行后续 MEMS 工艺。

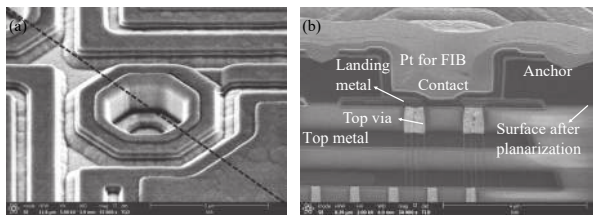


图 6 (a) MEMS 微桥结构 Topview SEM 照片; (b) 支撑和接触孔截面 SEM 照片

Fig.6 (a) Topview SEM of MEMS micro-bridge structure; (b) Cross-sectional view SEM of anchor and contact structure

支撑和电连接孔结构用于实现悬空 MEMS 微桥结构的机械支撑, 并实现微桥表面热敏电阻薄膜和读取电路的电连接。文中使用沟槽优先的技术方案实现该结构, 即先在牺牲层上光刻刻蚀沟槽停在着陆金属 (见图 6 的“Landing Metal”) 上, 形成支撑孔图形; 接着沉积介质层和敏感层; 然后在支撑孔底部光刻刻蚀形成接触孔; 最后沉积薄金属电极层实现微桥表面热敏电阻薄膜到读取电路的电连接。如图 6 所示, 是文中微测辐射热计器件的俯视 SEM 照片, 以及支撑和电连接孔结构的截面 SEM 照片。可以看到, 该方案支撑孔和接触孔结构内是空心的, 没有设置金属塞或介质塞, 具有低成本和低工艺复杂性的特点, 且整个结构呈现良好的物理形貌, 未发现结构中有任何工艺问题或损伤。

3.3 敏感层电阻结构开发

敏感层电阻是微测辐射热计器件的核心。如图 2 和图 3 所示, 文中使用薄金属电极层图形定义敏感层电阻, 其工艺方法是在敏感层上沉积金属电极, 然后通过光刻刻蚀形成电极层图形。可以看到, 电极层图形化时, 刻蚀工艺会直接接触敏感层材料, 如该工艺控制不好, 会损伤到敏感层材料, 并影响敏感层电阻均匀性。

经对比实验和工艺优化, 文中最终选择高选择比

的湿法工艺实现薄金属电极的刻蚀, 以降低该步工艺对敏感层材料的损伤。如图 7 所示, 是完成电极层图形化工艺后的敏感层电阻结构截面 TEM 照片, 可以看到, 非晶硅敏感层几乎没有受到任何工艺损伤, 且电极层图形边界清晰, 没有看到湿法工艺导致的电极层侧面腐蚀问题。图中, 由于 CVD 成膜工艺的保行特性, CVD 生长敏感层薄膜时, 会在表面呈现出其下方牺牲层薄膜表面的起伏形貌。

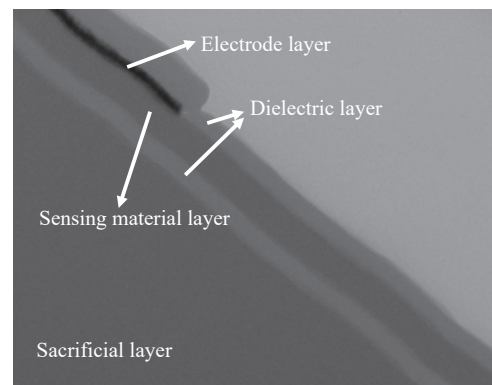


图 7 微桥表面非晶硅敏感层电阻结构的截面 TEM 照片

Fig.7 Cross-sectional TEM photo of a-Si sensing resistor on the micro-bridge surface

3.4 ASIC+MEMS 单芯片集成可行性评估和验证

文中采用与半导体工艺兼容的技术方案, 在 ASIC 读取电路硅片之上构建 MEMS 微桥谐振腔结构, 从而实现 ASIC 和 MEMS 的单芯片集成。由于 MEMS 工艺需要引入较厚的叠层薄膜, 并形成较大的硅片表面凹凸起伏形貌, 在加上读取电路硅片自身的翘曲, 这将导致严重的硅片翘曲, 因此单芯片集成要解决得首要问题就是硅片的全局应力问题。业界一般将翘曲硅片作为圆的一段“圆弧”, 并将该圆的半径定义为曲率半径, 用来评估硅片翘曲程度。通过应力测试设备, 文中首先确认了 ASIC 硅片的翘曲程度, 得到其曲率半径在 -80 m 左右; 然后对整个 MEMS 工艺进行了集成优化, 包括各叠层薄膜的应力控制和应力平衡等, 重点将较厚的牺牲层薄膜应力调整低于 100 MPa 的张应力模式, 一方面避免硅片翘曲加重, 一方面避免相邻工艺的应力模式变化太大, 导致的薄膜剥落问题。

经工艺优化后, 在整个 MEMS 集成工艺过程中

使得硅片曲率半径绝对值始终大于 80 m, 从而以保证 ASIC+MEMS 单芯片集成产品的性能。

3.5 敏感层电阻电学特性评估

文中开发的敏感层电阻是由电极层图形定义的, 是微测辐射热计器件的核心组成部分, 需要对其电学特性进行综合评估。如图 8 所示, 是使用 HP4156 C 对该器件以电压扫描方式测试得到的 $I-V$ 曲线。可以看到, 其电阻值在 250 k Ω 左右, 且经线形拟合后 $I-V$ 曲线呈现良好的线形关系, 其线形相关系数 $R^2=1$, 即敏感材料层电阻结构中, 电极层金属与非晶硅敏感层呈现出良好的欧姆接触特性。

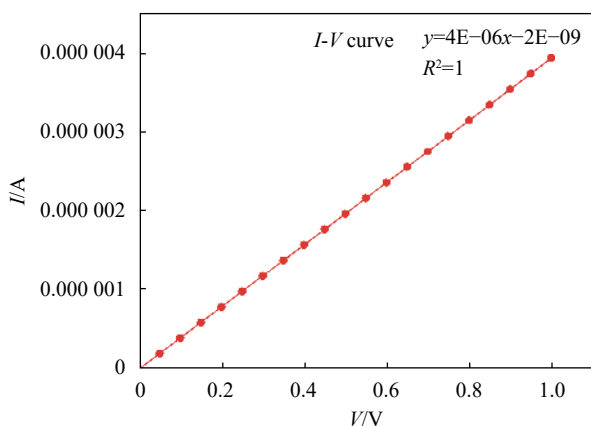


图 8 电极层定义的非晶硅热敏电阻薄膜的 $I-V$ 曲线

Fig.8 $I-V$ curve of electrode layer defined α -Si sensing resistor device

完成整个工艺流程后, 需要对器件级敏感层电阻的 TCR 这一关键特性进行测试, 以评估其结构和集成工艺对敏感层材料的影响, 及其是否满足量产产品的需求。在 $-25\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ 升温 and 降温条件下, 以 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 为温度间隔, 对敏感层电阻结构在不同温度下的电阻值进行了测试, 并计算其相邻测试温度下的平均 TCR, 以 T_1 和 T_2 两个相邻测试温度为例, 其平均 $\text{TCR}_{T1}=(R_{T2}-R_{T1})/(T_2-T_1)/R_{T1}$ 。如图 9 所示, 可以看到升降温情况下, 其 TCR 曲线基本重合, 没有出现明显的滞回现象; 同时, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下器件级敏感层电阻的 TCR 约为 -2% 左右, 略低于光片无图形薄膜材料 TCR 的测试值 (见图 4), 原因是由于梁结构、无柱支撑结构侧壁和底部、接触孔底部等结构的薄金属电极构成的寄生电阻占总电阻比例较高, 且金属的电阻温度系数较小导致。该器件电学特性与业界报道数据相当^[20], 能够满足产品性能要求。

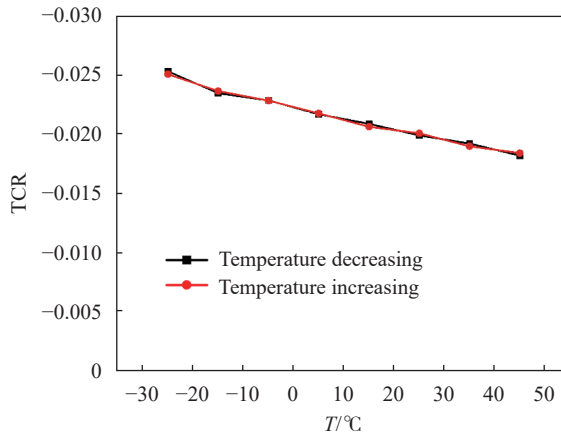


图 9 电极层定义的热敏电阻薄膜的 TCR 曲线

Fig.9 Relationship of TCR with temperature of α -Si sensing resistor

3.6 释放后悬空 MEMS 微桥结构特性评估

完成微测辐射热计器件的 MEMS 工艺后, 使用释放工艺去除牺牲层薄膜, 从而形成悬空的 MEMS 微桥结构。由于微测辐射热计主要用于成像相关应用, 需要以上述 MEMS 微桥结构的器件为单元, 组成大面积阵列以实现成像功能, 因此需要评估其微桥结构单元和阵列的平坦度和均匀性。

MEMS 微桥表面的平坦度是由其组成的各膜层应力决定的, 需要对其薄膜应力进行匹配设计和优化。以应力匹配为例, 如果其中某一层薄膜具有向上 (张应力) 或向下 (压应力) 的应力模式, 则需要相反应力模式的薄膜来平衡应力。而当微桥上的薄膜层次较多时, 整个应力平衡的过程控制将非常困难。为了得到平坦的微桥表面, 避免复杂的多层薄膜应力平衡, 每层薄膜的应力都要被很好地控制在较低的水平。同时, 需要严格控制各层薄膜的膜厚均匀性, 可以保证各层薄膜应力能够均匀地施加到硅片内各个单元微桥表面上, 避免出现局部应力不均匀导致的良率损失。

经过工艺优化, 使用光学显微镜对释放后悬空的 MEMS 微桥阵列进行均匀性评估。如图 10 所示, 可以看到, 显微镜光学视场内 MEMS 微桥阵列呈现均匀的颜色, 仅有一个位于右下角最外侧的单元结构出现失焦现象, 表明文中方案开发的 MEMS 微桥结构释放后具有良好的均匀性, 能够很好地满足该产品的需求。

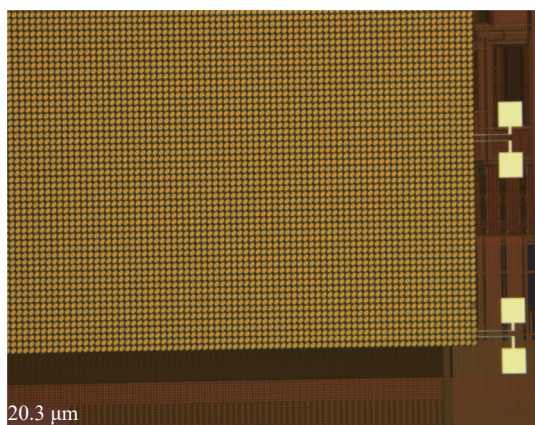


图 10 释放后 MEMS 微桥结构微测辐射热计器件阵列的光学形貌数据

Fig.10 Optical photo of MEMS micro-bridge structure based micro-bolometer array device after releasing

4 结 论

文中采用与半导体工艺兼容的工艺方案,开发了基于 MEMS 微桥结构的微测辐射热计器件,其中,开发基于半导体 CVD 技术的非晶硅工艺作为关键敏感层材料,实现了与半导体工艺良好的兼容性;开发沟槽优先工艺集成方案实现 MEMS 接触模块,而无需金属塞或介质塞,能够大幅度降低成本和工艺复杂性;开发高性能敏感层电阻图形化技术,实现良好的欧姆接触特性和优异的 TCR 特性;同时,通过工艺开发和结构/工艺优化设计,由该器件组成的悬空 MEMS 微桥阵列呈现良好的平坦度和均匀性。经过对该器件的模块工艺、集成方案、结构形貌、电学特性等进行了测试和评估,结果表明,文中技术方案能够很好地满足微测辐射热计器件及对应的单芯片集成非制冷红外探测器产品的量产技术需求。

参考文献:

[1] Wang X. Research progress of infrared focal plane array detector [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(9): 157-161. (in Chinese)

[2] Niklaus F, Vieider C, Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: A review [C]//MEMS/MOEMS Technologies and Applications III, Proc of SPIE, 2008, 6836: 68360D.

[3] Xu D, Wang Y, Xiong B, et al. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(4): 557-566.

[4] Pirro S, Mauskopf P. Advances in bolometer technology for fundamental physics [J]. *Annual Review of Nuclear and*

Particle Science, 2017, 67: 161-181.

[5] Tanaka A, Matsumoto S, Tsukamoto N, et al. Infrared focal plane array incorporating silicon IC process compatible bolometer [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(11): 1844-1850.

[6] Rogalski A. Infrared detectors: An overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43: 187-210.

[7] Yu L, Guo Y, Zhu H, et al. Low-cost microbolometer type infrared detectors [J]. *Micromachines*, 2020, 11(9): 1-19.

[8] Hanson C M, Beratan H R, Owen R A, et al. Uncooled thermal imaging at texas instruments [C]//Proceedings of SPIE 1735, - The International Society for Optical Engineering, 1993, 2020: 330-339.

[9] Wood R, Han C, Kruse P. Integrated uncooled infrared detector imaging arrays [C]//Proceedings of the Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, USA, 22-25 June 1992: 132-135.

[10] Yu L J, Tang L B, Yang W Y, et al. Research progress of uncooled infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(1): 20211013. (in Chinese)

[11] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends - sciencedirect [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(2-3): 59-210.

[12] Tan C L, Mohseni H. Emerging technologies for high performance infrared detectors [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 169-197.

[13] Ma X, Li Y X, Huang R Y, et al. Development and application of short wave infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210897. (in Chinese)

[14] Lin P S, Shen T W, Chan K C, et al. CMOS MEMS thermoelectric infrared sensor with plasmonic metamaterial absorber for selective wavelength absorption and responsivity enhancement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(19): 11105-11114.

[15] Kim K D, Park S, Lee B, et al. A 80×60 micro-bolometer cmos thermal imager integrated with a low-noise 12-bit DAC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 69(8): 8604-8608.

[16] Wang J, Tang Z, Li J, et al. A microPirani pressure sensor based on the tungsten microhotplate in a standard cmos process [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(4): 1086-1091.

[17] Kovacs, Gregory T A. *Micromachined Transducers Sourcebook*[M]. US: McGraw-Hill Inc., 1998.

[18] Arrieta I. Wien's displacement law and blackbody radiation quartiles [J]. *The Physics Teacher*, 2021, 59(6): 464-466.

[19] Martin A. *Green: Solar Cells*[M]. US: Prentice-Hall Series in Solid State Physical Electronics, 1982.

[20] Zhong X, Kang X, Shen R. Physical and electrical characterization of doped amorphous silicon resistor [C]// 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT). IEEE, 2020: 1-4.