

微型红外辐射探测芯片的设计及实验研究

梁中翥

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 针对太阳辐照度测量仪器高性能及微型化的要求,研究了一种绝对辐射计的关键器件——微机电系统(MEMS)微型红外辐射探测芯片。该芯片以在红外宽光谱范围内具备高吸收率的镍磷黑膜层吸收辐射,以高机械性能、高热导率且绝缘的金刚石材料作为基片,利用集成的薄膜电阻丝进行电加热等效。制备的镍磷黑红外吸收膜层的表面具有较多无规则微孔,其直径分布在 $50\text{ nm}\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,形成一个布满微孔特征的表面。镍磷黑红外吸收膜层的反射率在 $1.5\sim 16\text{ }\mu\text{m}$ 光谱范围为 0.4% 以下,其红外透射比在 $1.5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 波段为 0.15% 以下,从而有效吸收率达到 0.99 以上。选择电学性能稳定的康铜材料作为薄膜电阻丝材料,采用MEMS工艺制备薄膜电阻丝。薄膜电阻丝的电阻稳定在 $50.3\text{ k}\Omega$,能够满足红外辐射探测芯片的设计要求。

关键词 测量;太阳辐照度;绝对辐射计;红外辐射探测芯片;镍磷黑吸收膜;微机电系统(MEMS)技术

中图分类号 O432 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1112009

Design and Experimental Study on Micro Infrared Radiometer Chip

Liang Zhongzhu

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To meet the needs of high performance and microminiaturization of solar irradiance measuring instruments, the key device of absolute radiometer — the micro infrared radiation detection chip, is designed and its theories are analyzed. The bar type diamond with high mechanical performance, high thermal conductivity and high insulation is used for the base of chip. NiP absorbent films that have a high absorptivity in wide spectral range are used to absorb light. The surfaces of nickel-phosphorus black film for infrared absorption have many irregular pores, with the diameters ranging from 50 nm to $10\text{ }\mu\text{m}$. The reflectivity of NiP films is less than 0.4% at $1.5\sim 16\text{ }\mu\text{m}$, the transmittance is less than 0.15% at $1.5\sim 16\text{ }\mu\text{m}$, and the absorptivity is more than 0.99 . Thin film resistor is made of constantan which has a good electrical performance. The resistor is prepared by micro-electro-mechanical system (MEMS) technology. The resistance of the thin film resistor is $50.3\text{ k}\Omega$ and does not change with temperature, which can meet the requirement of the chip.

Key words measurement; solar irradiance; absolute radiometer; infrared radiation detection chip; NiP black absorbent film; micro-electro-mechanical system (MEMS) technology

OCIS codes 120.4640; 230.4685; 040.3060; 120.6810; 130.6010

1 引 言

太阳光辐射作为地球系统的主要外部能源,对地球的大气、气候与气象的变化及生态环境影响巨大^[1~3]。对太阳辐射的测量是研究太阳对地球和人类影响的重要途径,世界范围内中长期的天气、气候预报需要精确的太阳辐照度数据。现阶段针对太阳

辐射的研究主要集中于太阳总体辐出度的测量^[3~6]。绝对辐射计可以不依赖于任何辐射标准而直接确定辐射标度,能够获得精确的太阳常数数据。

红外(IR)辐射探测芯片是绝对辐射计上进行红外辐射吸收和电加热等效的关键元件。研制快速响应、高精度的红外辐射芯片能够实现长期的、不间

收稿日期: 2011-04-27; **收到修改稿日期:** 2011-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61007023)和吉林省科技发展计划(20090351,20080122)资助课题。

作者简介: 梁中翥(1978—),男,博士,副研究员,主要从事微光机电系统、光谱仪器及光学材料等方面的研究。

E-mail: liangzz@ciomp. ac. cn

断的太阳辐射测量,获取高精度的太阳辐射数据,进一步研究太阳辐出度变化周期、规律、趋势及对气候改变的影响。高集成的微型化红外辐射探测芯片对降低绝对辐射计的平衡时间有着重要意义^[1,2]。微型化的红外辐射探测芯片具备低的热容量,从而能有效提高绝对辐射计的响应速度^[4]。缩小红外辐射探测芯片各个组成部分的体积是实现芯片低热容量的有效方法。辐射吸收膜层吸收率的提高将增加吸收的辐射量,有效提高器件的响应度,因此,提高红外辐射探测芯片的辐射吸收膜层的吸收率有助于获得高性能的绝对辐射计。所以,本文针对条形红外辐射探测芯片的高性能及微型化的要求,设计并制备了镍磷黑膜-银膜-基底的高吸收膜系结构,理论分析并设计了条形微型红外辐射探测芯片,集成制作了电加热元件,并分别对结果进行了测试。

2 红外辐射吸收膜及微型探测芯片设计

2.1 红外辐射吸收膜设计及芯片结构

绝对辐射计的测量原理是光线从打开状态的快门进入辐射计,经过视场光阑、消杂散光光阑及主光阑等入射到吸收层,吸收层将辐射能转化为内能,经由温度传感器探测温度变化,当其达到准热平衡状态时,温度传感器输出的电信号基本稳定,记录此电信号,第一阶段辐射吸收结束。此时关闭快门,开始电定标过程,电路开始加热辐射吸收载体,当温度传感器的输出与第一阶段输出相同时,停电定标,此时的电功率即等效为辐射功率^[2~5]。

辐射吸收膜层吸收率的提高将增加吸收的辐射量,从而提高红外辐射探测芯片的平衡温度。所以,提高器件的响应度可以通过采用高吸收率的光辐射吸收膜层来达到。因此,器件响应度的提高和平衡时间的减少可以通过改进红外辐射探测芯片的辐射吸收膜层、提高膜层的吸收率来实现。如果辐射吸收膜层在宽光谱范围内具备较高的吸收率,就能加大绝对辐射计的测量谱宽及提高其响应度。镍磷黑镀层是一种合金镀层,可采用电镀方法制成,其性能稳定,且粗糙度合适的表面具有很好的消光性和高吸收率,能起到减反射的作用^[7~9],所以本文采用镍磷黑膜层作为红外辐射吸收膜层,同时利用吸收-反射复合膜层来再次提高辐射吸收膜的吸收率。设计镍磷吸收膜层为第一层膜,底层膜为银膜,它既能在电镀镍磷黑膜时起到导电作用,又能够将透过镍磷

黑膜且大于临界波长的红外辐射反射回镍磷吸收膜层进行再次吸收。因此,选用溅射银膜为导电膜和红外高反射膜,以电镀镍磷黑吸收膜层为高吸收层,摸索合适的工艺条件制得符合要求的表面形貌,研制镍磷黑膜-银膜-基底的吸收膜系结构。

针对红外辐射探测芯片高性能及微型化的要求,需要选择高机械性、导热性能良好且绝缘的材料作为基片。金刚石具有最高的热导率 $[20 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$ 和硬度,是优良的电绝缘体^[10],并且热容能满足辐射热探测器件的要求,是辐射热探测器件所需功能材料的最佳选择,因此选取高纯度的金刚石片作为芯片的基底材料。设计的条形红外辐射探测芯片是一个两面附有微精细结构的长方体平板,两面附着的微结构分别吸收辐射和等效加热,从而进行辐射的吸收和探测。图1是条形红外辐射探测芯片的结构设计图,芯片尺寸为 $1.4 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$,芯片的A面为镍磷黑膜-银膜辐射吸收膜层,用来吸收入射的光辐射;B面为电加热元件,用作电加热以等效光辐射。

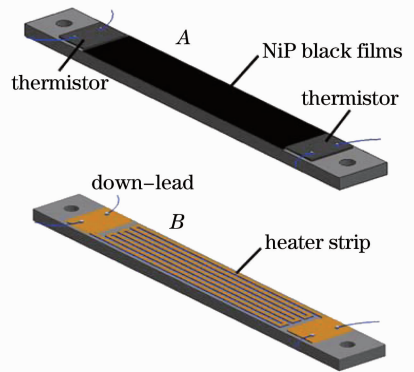


图1 条形红外辐射探测芯片的结构设计图
Fig.1 Diagrammatic sketch of a strip of radiation detection chip

2.2 吸收膜层吸收率与芯片热平衡过程计算

将条形红外辐射探测芯片置于测量环境中,使其与被测辐射源及其他环境物体交换能量。红外辐射探测芯片的响应度与其平衡温度相关,若其平衡温度与初始温度相差很小,则响应度不高,要提高器件响应度就必须提高器件的平衡温度。计算芯片的热平衡过程需要考虑芯片的能量增量。红外辐射探测芯片采用金刚石材料,其热导率高达 $1700 \sim 2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而器件体积又很小,所以可以忽略器件内部的温度梯度。根据热力学第一定律,平衡时红外辐射探测芯片的能量方程为

$$U_{\text{in}} - U_{\text{out}} + U_{\text{g}} = U_{\text{get}}, \quad (1)$$

式中 U_{in} 为流入芯片的能量, U_{out} 为流出芯片的能量, U_g 为金刚石芯片自身生成的能量, U_{get} 为芯片能量净增量。

将(1)式各项对时间求导, 可得出金刚石芯片的能量随时间的变化关系

$$d(U_{in} - U_{out} + U_g)/dt = dU_{get}/dt. \quad (2)$$

在进行太阳辐射测量时, 绝对辐射计吸收一个太阳常数的能量, 流出的能量分为三部分: 芯片通过支架流入热沉的能量; 芯片同空气热对流交换的能量, 以及芯片自身和外界温差导致辐射的能量。金刚石芯片不存在自生成的能量部分, 故这部分能量为零, 红外辐射探测芯片温度随时间的变化方程可以写作

$$P_0 - K(T - T_c) - hS_2(T - T_c) -$$

$$[S_2\sigma\xi(T^4 - T_c^4) + S_1\sigma\epsilon(T^4 - T_c^4)] = C \frac{dT}{dt}, \quad (3)$$

式中 S_1 为辐射吸收膜层接受太阳辐射的面积, S_2 为除被吸收黑膜层覆盖范围以外的金刚石表面积; 这里的辐射吸收层的吸收率为 ϵ , 金刚石辐射率为 ξ 。此方程为红外辐射探测芯片的能量平衡方程具体表达形式。

考虑从能量开始流入到金刚石芯片且出入能量达到平衡的过程中温度随时间的变化。由(3)式, 代入各个常数, 得出芯片温度随时间的变化曲线。图2中实线为只考虑热传导而计算出来的平衡曲线, 两条虚线分别是考虑了热传导、热对流和热辐射情形下计算出的平衡曲线和软件模拟值曲线, 结果显示在综合考虑热传导、热对流和热辐射的情形下, 计算出的平衡时间更加接近软件模拟值。由图2可知, 辐射入射初始几秒内, 温度曲线迅速上升, 在接近平衡后, 温度开始缓慢变化, 呈类指数规律。当 $K=0.01 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{s})$ 时, 辐射计平衡温度为 295.2797 K , 低于其他辐射计的平衡温度; 平衡时间(99.995%)为 9.23 s , 远小于其他辐射计的平衡时间。这是因为采用了比热容小的条形结构, 导致本设计的条形红外辐射探测芯片的热容量远远小于其他类型辐射计的热容量, 并且采用热导率高的金刚石材料, 同时芯片和支架导热率大, 所以条形红外辐射探测芯片平衡时间得到了有效缩短。虽然这会略微降低平衡温度, 从而影响器件的响应度, 但器件的平衡时间却得到了大大的降低, 从传统的绝对辐射计的 90 s 降低为 9.23 s 。因此, 需要对芯片综合设计, 兼顾其平衡时间和响应度。

红外辐射探测芯片采用金刚石制作, 为非金属电介质材料, 其辐射率一般在 $0.85 \sim 0.95$ 之间, 受

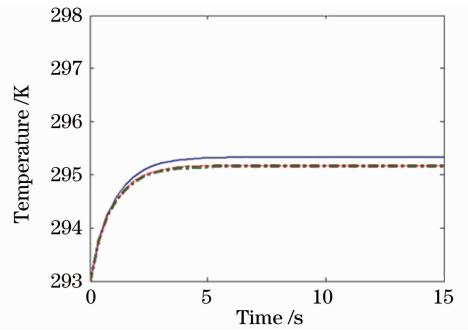


图2 芯片温度随辐射时间的变化曲线

Fig. 2 Relationship between temperature of chip and radiation time

表面形貌及温度影响不大, 故取其在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近时的辐射率 $\xi=0.9$ 。辐射吸收膜层吸收率的值会影响红外辐射探测芯片平衡时间。由(3)式, 以 $\epsilon=0.5$ 的吸收率为基准, 当 ϵ 增长时, 红外辐射探测芯片的平衡时间与 $\epsilon=0.5$ 时的平衡时间差值如图3所示(差值的符号为负)。由图3可知, 随着辐射吸收率的升高, 红外辐射探测芯片的平衡时间与 $\epsilon=0.5$ 时的平衡时间差值总体趋势是升高的, 即平衡时间在降低。吸收率为 0.99 时的平衡时间比吸收率为 0.5 的平衡时间降低了约 37 ms 。这是由于辐射吸收膜层吸收率的提高增加了红外辐射探测芯片与外界的能量交换速度, 所以红外辐射探测芯片平衡时间得到了缩短。因此, 在制作红外辐射探测芯片的过程中可以通过提高辐射吸收膜层的吸收率来降低平衡时间, 提高探测器的性能。

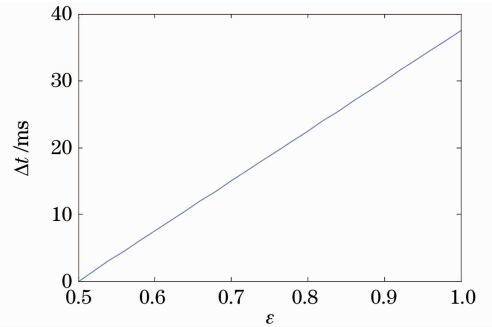


图3 吸收膜层吸收率与红外辐射探测芯片平衡时间差值关系曲线

Fig. 3 Relationship between the absorptivity of film and difference value of balance time of IR radiation detection chip

考虑红外辐射探测芯片的平衡温度。当红外辐射探测芯片能量净增量随时间的变化率为 0 时, 芯片达到平衡温度 T_0 , 进入平衡状态, 此时有

$$P_0 - K(T - T_c) - hS_2(T - T_c) - [S_2\sigma\xi(T^4 - T_c^4) + S_1\sigma\epsilon(T^4 - T_c^4)] = 0. \quad (4)$$

当 ϵ 取值不同时,会影响平衡温度的值,以红外辐射探测芯片的初始温度为基准,当 ϵ 由0.5升高到1时平衡温度相对于初始温度的差值曲线如图4所示。

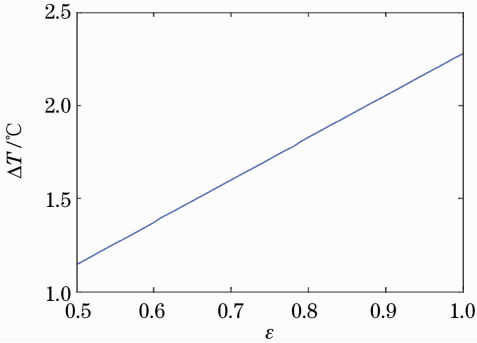


图4 吸收膜层吸收率与红外辐射探测芯片平衡温度差值关系曲线

Fig. 4 Relationship between the absorptivity of film and difference value of balance temperatures of IR radiation detection chip

红外辐射探测芯片的初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, $\epsilon=0.5$ 的平衡温度为 $21.120\text{ }^\circ\text{C}$,随着辐射吸收率的增加,红外辐射探测芯片的平衡温度总体趋势增大, $\epsilon=0.99$ 时的平衡温度为 $22.256\text{ }^\circ\text{C}$ 。辐射吸收膜层吸收率的提高将增加吸收的辐射量,从而提高了辐射探测器的平衡温度。所以,提高器件的响应度和降低其平衡时间可以通过采用高吸收率的辐射吸收膜层来达到。

2.3 探测芯片的薄膜电阻丝

电加热元件的作用是在绝对辐射计探测辐射的第二阶段进行红外辐射的电加热等效,因此,需要可靠性高且体积小、易于集成的加热电阻。薄膜电阻丝体积很小,和基底之间结合很好,没有中间的封装层阻隔,传热损失小、导热快并且与基底的附着良好,具备较高的导热性能和机械性能。薄膜电阻丝可以采用薄膜材料光刻制成,易于集成在红外辐射探测芯片上,并且将其进行蛇形迂回设计,可以增加电阻丝的有效长度,适合集成在芯片上作为电加热元件,有效减小芯片体积。康铜具有适中的电阻率和较宽的温度适用范围,可以保证电阻丝稳定的电学性能,因此采用康铜作为电阻丝材料。

3 红外辐射吸收膜层及探测芯片的制作

3.1 红外辐射吸收膜层

红外辐射吸收膜的高吸收率不仅能通过物质的

电子跃迁和吸收光辐射产生,制作粗糙表面、利用多孔效应对光辐射进行多次反射和多次吸收也可获得高吸收率。镍磷黑膜是一种具有粗糙表面的深黑色材料,具有很好的消光性能和高吸收率,它常用于光学仪器和摄影设备零部件的镀覆,起到消杂散光作用。镍磷黑膜对太阳辐射有着较高的吸收率,也可用于太阳能集热板。通过在金刚石基底上构建一个镍磷黑膜-银膜-基底的吸收膜系结构,并且利用镍磷黑膜具有合适的微孔结构的表面,实现粗糙表面对红外辐射的有效吸收。

镍磷黑膜可采用电镀方法制成,性能稳定,能起到减反射的作用。通过改善镍磷黑膜镀层的制备工艺条件,可以调整和改变其表面粗糙度,从而提高其对光线的吸收率。电镀时的电镀液通常采用硫酸盐电镀液,其配方如表1所示。

表1 镍磷黑膜电镀液配方表

Table 1 Solution for electroplating NiP black films

Formula and parameter	Value
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	100~120
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	22~25
$\text{KSCN} / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	35
$\text{H}_3\text{BO}_3 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	25
$\text{Na}_2\text{SO}_4 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	23
pH	5.8~6.2
Temperature / $^\circ\text{C}$	18~30
Cathodic current density / $(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	10~15

实验采用的电镀工艺如下:首先用去离子水、丙酮和乙醇对金刚石基片进行超声清洗,在清洗之后的基片上磁控溅射一层银膜。然后将基片带电入槽,采用硫酸盐电镀液在室温下搅拌电镀,利用温度控制柜调节镀液温度在 $25\text{ }^\circ\text{C} \sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。其电镀工艺流程见图5。当电镀的电流强度为 0.45 mA 、电压为 0.75 V 、电镀时间为 0.8 h 时,镍磷黑膜镀层的表面较粗糙,与基底附着性好,并且黑度均匀,如图6所示。在显微镜下观察可发现镍磷黑膜表面形成了许多小孔结构,且表面凹凸不平,这些结构可以对光辐射进行多次吸收,产生深黑色的效果。当电镀电流强度过大时,镍磷黑膜层表面容易吸附氢气气泡从而使镀层出现白点;当电镀电流强度偏小时,膜层出现彩色,并且黑度较浅,不均匀。

3.2 薄膜电阻丝

设计芯片的薄膜电加热丝电阻为 $50.3\text{ k}\Omega$,故此电阻值计算电阻丝总长度约为 15 cm 。通过磁控溅射工艺制备康铜膜,并控制其厚度为 $300 \sim 400\text{ nm}$ 。采用光刻工艺制作薄膜电阻丝光刻胶图

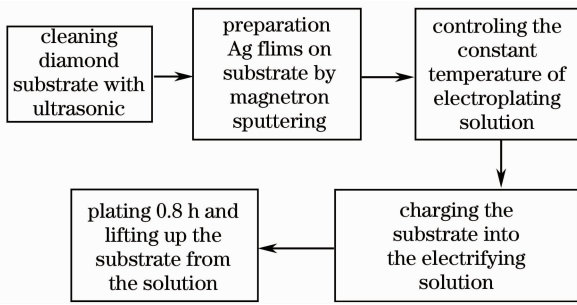


图 5 电镀镍磷黑红外吸收膜工艺流程图
Fig. 5 Process of electroplating NiP black IR absorption films

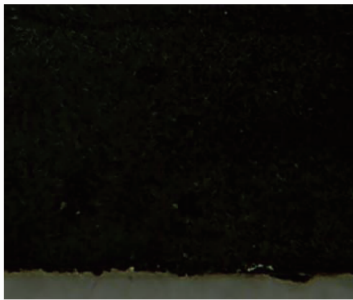


图 6 镍磷黑红外吸收膜照片

Fig. 6 Photograph of NiP black IR absorption film

形, 实验中选用 BP213 紫外光刻胶, 通过大量实验对比发现, 匀胶转速为 1800 r/min 时, 达到所需胶膜厚度, 适合在金刚石基片表面制作电阻丝图形。实验中最优的前烘条件为 100 °C 烘焙 90 s; 当曝光时间控制在 130~140 s 之间时曝光量合适; 显影时间控制在 15~20 s 之间较合适。图 7(a) 是光刻完成后加热电阻丝的部分光刻胶图形。

在芯片上光刻形成薄膜电加热丝胶图形后, 采用酸腐蚀液制作加热电阻丝。薄膜电加热丝宽度直接关系到电阻值的大小, 因此, 需要进行多次实验以选择合适的腐蚀液及其浓度, 减小腐蚀液对电阻丝的侧蚀。若腐蚀液的腐蚀速率过快, 易造成电阻丝侧蚀严重, 电阻值较难控制, 并且电阻丝容易被腐蚀断。图 7(b) 是采用硝酸腐蚀液腐蚀形成的电阻丝, 采用浓硝酸与水体积比为 1:2 的腐蚀液, 腐蚀时间约为 20 s, 其腐蚀速率均匀, 图形边缘清晰陡直。在电阻丝制作完成后, 再通过光刻制作一层保护层及引线。

4 测 试

合适的粗糙表面能增加光的反射次数, 光线通过多次反射、吸收, 达到一个较低的反射率, 从而提高吸收率。镍磷黑红外吸收膜的扫描电镜图片如

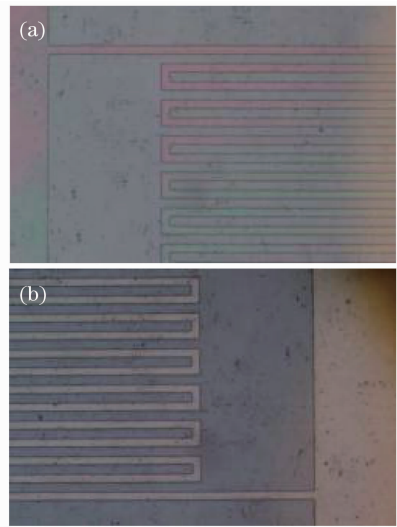


图 7 (a) 薄膜电加热丝的部分光刻胶图形;
(b) 硝酸腐蚀形成的电阻丝

Fig. 7 (a) A section of photoresist of film electric heating wire; (b) the heating resistance wire eroded by HNO₃

图 8 所示, 图片显示膜层表面形成了很多无规则微孔, 并且这些孔的直径分布在 50 nm~10 μm, 孔的直径越小, 其周围尖锐的凹凸结构越多, 形成一个布满微孔特征的表面。由此可见, 镍磷黑红外吸收膜层表面有着特殊的微观尺度的微孔结构, 能对光进行多次反射并吸收。

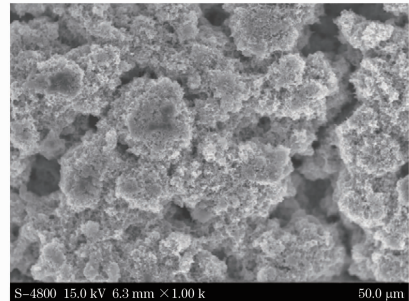


图 8 镍磷黑红外吸收膜的表面形貌

Fig. 8 Scanning electron micrograph of NiP black IR absorption film

将实验制备的镍磷黑红外吸收膜层进行红外反射率测试和透射比测试。图 9 所示反射谱表明其反射率在 1.5~16 μm 波段为 0.4% 以下。图 10 是镍磷黑吸收膜的红外透射率光谱图, 表明其透射比在 1.5~15 μm 波段为 0.15% 以下。由实验结果可知, 此膜层材料的表面较粗糙、微结构较多且黑度均匀, 最高有效吸收率达到 0.99 以上, 有效提高了红外辐射探测芯片辐射吸收膜层的吸收率, 这将提高芯片的响应度和平衡温度, 红外辐射探测芯片的整

体性能将得到改善。

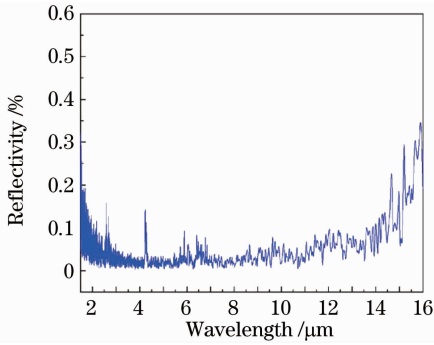


图 9 镍磷黑吸收膜的红外反射率光谱

Fig. 9 IR reflectance spectrum of the NiP black absorption films

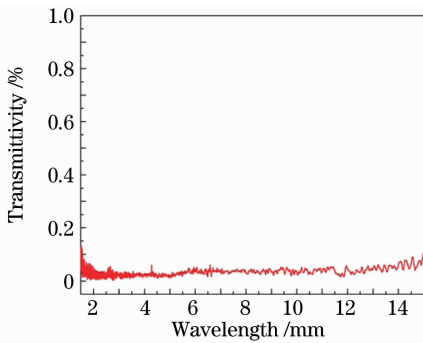


图 10 镍磷黑吸收膜的红外透射比光谱

Fig. 10 IR transmittance spectrum of the NiP black absorption films

电阻丝的温度稳定性对红外辐射探测芯片的测量十分重要,如果电阻丝的电阻随温度变化过快,将严重影响测量结果的准确性,因为红外辐射探测芯片的温度随着快门开关,即红外辐射吸收与断开在不断变化。薄膜电加热丝的温度测试是在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行的。将芯片预先置于温控柜中,开始阶梯加热并测量电阻丝的电阻值,分别记录每个温度处的电阻值。图 11 为薄膜电加热丝在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的电阻变化曲线,测试结果表明,康铜丝电阻稳定在 $50.3\text{ k}\Omega$,满足辐射探测要求。

5 结 论

针对红外辐射探测芯片高性能及微小型化的设计目标,设计了条形微型红外辐射探测芯片。红外辐射探测芯片以机械性能好、导热性能良好且绝缘的金刚石材料作为基片,以在宽光谱范围内具备高吸收率的镍磷黑膜层吸收辐射,利用导热良好、集成的薄膜电阻丝进行电加热等效。镍磷黑红外吸收膜层的表面形成了较多无规则微孔,并且这些孔的直径分布在 $50\text{ nm}\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,形成一个布满微孔特征的

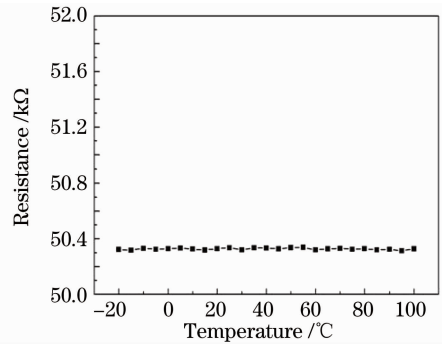


图 11 薄膜电加热丝电阻变化曲线

Fig. 11 Resistance curve of the film electric heating wire 表面,这些微孔结构能对光辐射进行多次反射并吸收。制备的镍磷黑膜层的反射率在 $1.5\sim 16\text{ }\mu\text{m}$ 波段为 0.4% 以下,其红外透射比在 $1.5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 波段为 0.15% 以下,有效吸收率达到 0.99 以上,这将提高芯片的响应度和平衡温度,对提高红外辐射探测芯片的性能起关键作用。采用微机械工艺在红外辐射探测芯片上制备出了康铜薄膜电阻丝,并对薄膜电加热丝的电阻值进行了实验测试,测试结果表明:薄膜电加热丝的电阻值符合设计要求,且其值基本不随温度变化,稳定值为 $50.3\text{ k}\Omega$,能够满足红外辐射探测芯片的性能要求。

致谢 衷心感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所梁静秋、禹秉熙、方伟老师以及李亚楠、苏法刚同学等在器件制作和测试中对作者的帮助。

参 考 文 献

- Richard C. Willson, Hugh S. Hudson. The sun's luminosity over a complete solar cycle [J]. *Nature*, 1991, **351** (6321): 42~44
- Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. The radiation exchange between the space and the absolute radiometer along with the solar observation on spacecraft [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1048~1052
禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时同太空背景的辐射交换 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1048~1052
- Chen F., Zheng X. B.. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(3): 415~420
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(3): 415~420
- Wang Y. P., Fang W., Gong C. H. *et al.*. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2007, **15**(11): 1662~1667
王玉鹏, 方伟, 弓成虎等. 双锥腔互补型绝对辐射计 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1662~1667
- Yu Bingxi, Yao Haishun, Fang Wei. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically heating compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25** (6): 786~790
禹秉熙, 姚海顺, 方伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测

- 量方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 786~790
- 6 Fang Wei, Wang Yupeng. Influence of UV radiation on absorptivity of cavity of absolute radiometer [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2006, **14**(5): 775~780
方 伟, 王玉鹏. 紫外辐照对绝对辐射计锥腔吸收率的影响[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(5): 775~780
- 7 Zupo Yang, Lijie Ci, James A. Bur *et al.*. Experimental observation of an extremely dark material made by a low-density nanotube array[J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(2): 446~451
- 8 A. Y. Vorobyev, Chunlei Guo. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 041914
- 9 Wu Jiang, Shen Weidong, Yuan Wenjia *et al.*. Anti-ultraviolet radiation of antireflection coatings for display plastics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0231001
武 江, 沈伟东, 袁文佳 等. 抗紫外辐射塑料显示面板的减反射膜[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0231001
- 10 E. A. Ekimov, V. A. Sidorov, E. D. Bauer *et al.*. Superconductivity in diamond[J]. *Nature*, 2004, **428** (6982): 542~545

栏目编辑:何卓铭