

微型红外线传感技术的最新发展*

宋雪君

(上海工程技术大学 上海 200336)

摘要 综述了红外传感器技术的最新发展.由于应用了薄膜型红外探测器、衍射光学聚光镜和共振压电斩波器,红外传感器实现了微型化,在许多领域中获得了广泛的应用.

关键词 薄膜型红外传感器,衍射镜,W型斩波器

LATEST DEVELOPMENTS IN MICRO-PYROELECTRIC INFRARED DETECTION

Song Xuejun

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200336)

Abstract Recent developments of pyroelectric infrared sensors are briefly reviewed. By employing a pyroelectric thin film detector, diffractive optical converging element and double-resonance type piezo-electric actuator, a miniature pyroelectric infrared thin film sensor is now available. These sensors find applications in many fields.

Key words pyroelectric thin film detector, diffraction lens, W-type piezo-electric actuator

1 引言

红外线是位于可见光和微波之间的电磁波,其波长范围从 $0.75\mu\text{m}$ 到几百 μm ,波长上限并不确定.自然界里一切物体都在辐射电磁波,根据玻尔兹曼定律,物体的辐射本领 R_T 与绝对温度 T 的关系为

$$R_T = \epsilon T^4 \quad (1)$$

式中 ϵ 为物体的辐射率.由上式可见,任何绝对温度不为零的物体的辐射本领都不为零.在温度较低时,热辐射中绝大部分是肉眼不能见的红外线.随着温度的升高,辐射的总功率增大,光强的分布由长波向短波转移.

如果我们的眼睛能看见红外光,那么即便是在没有月光的黑夜里,周围也将是一片熠熠生辉的世界.一般来讲,热一些物体显得更

亮,冷一些物体相对暗一些.通过测量热辐射的功率来确定物体温度的技术称为红外测温技术.近年来,红外测温技术从一维测量发展为二维测量,其应用领域不断扩大,在国民经济和军事中具有重要的应用,见表1.

表1 红外测温技术的应用

医 学	白血病、雷诺氏病的诊断,乳癌、皮肤癌的早期发现,血压下降、血管扩张等的药物效果的确认
工 业	炉温检测、压延钢板的温度分布的测定、高温钢铁块的探伤、发动机的热设计和检查、材料和制品的非破坏性检查、精制炉与蒸馏管的温度监视等
学 术 调 查、公 害 观 测	火山观测、植物的生长调查、资源探测、海流、红潮和冷水块的调查、气象分析、工厂排水、气体分布的监视等
治 安	火灾的早期发现、山火防止、遭灾发现、营救、夜间搜查
防 灾、防 盗	侵入者探测、火灾早期预报、自动门、来客报知

* 1998-09-25 收到初稿,1998-11-19 修回

红外检测按测量原理可分为两类:第一类,红外光作为负载能量,与光量子检测器发生作用,产生载流子,形成电信号,这一类传感器称为量子型传感器,其灵敏度较高,但有色散效应,信号强弱与波长有关;另一类则利用红外辐射的热效应,称热释电传感器,其优点是没有色散效应,但灵敏度较低,相应速度较慢.按测量方式来区分,可分为全场分析与逐点分析.全场分析是用红外成像镜头把物体的温度分布图像成像在二维传感器列阵(典型的探测列阵是IRCCD)上^[1],从而获得物体空间温度场(严格地说是辐射场)的全场分布,其信息量很大,但温度分辨率和空间分辨率都不高.全场分布探测系统又称为红外热像仪.逐点分析则是把物空间的一个局部区域的热辐射聚焦在单个探测器上,并通过已知物体的辐射率,将辐射功率转化为温度,即局部区域的平均温度,其温度测量精度较高.如果需要探测一个较大区域的稳定温度场,则必须通过扫描的方式逐点对温度场采样.逐点分析系统通常称为红外测温仪.

红外测温仪由聚焦光学部件、调制器、探测元件和信号处理系统构成,如图1所示.传统的红外测温仪的主要缺点是光学镜头过于复杂(如图1所示的反射型聚焦镜),信号从调制器到探测器的动作过慢,时间常数较大,仪器整体尺寸和重量嫌大等.而实际应用对检测的要求越来越高,要求仪器小型化和超小型化.不仅精度要求高,而且要求测量快速或暂态的温度场的变化.因此,国际上正致力于开发小型、高效、快速、精确、节能、成本低的红外测温仪.

红外检测常用于人体检测.检测的项目包

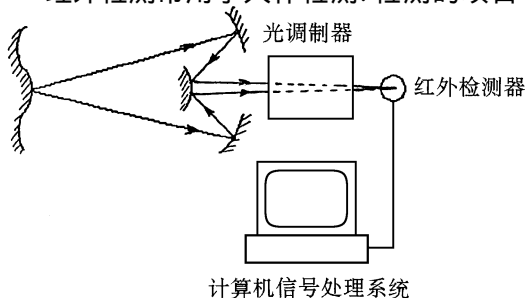


图1 红外测温仪的构造

括人体位置、移动方向,或者用于清点人数、防盗等,将此信息反馈给空调、照明设备或报警设备.这些都对红外检测器提出了越来越高的要求.特别是在保证精度的前提下实现仪器的小型化甚至微型化,成为当前红外测温仪发展的一个十分重要的趋势.而要实现这一目标,仪器的3个主要部件——聚焦镜头、调制器和探测部件都必须更新.实现小型化和微型化,这一更新换代的过程,与物理学和光电子学的最新发展有重要的联系.

2 衍射光学型聚焦镜

热辐射场与普通的可见光场相比,有两个显著的特征.首先,在大部分应用中,仪器用于探测常温甚至低温的物体.热辐射光强极大值对应的波长 λ_m 与绝对温度 T 的关系为

$$\lambda_m = 2898 / T \quad (\mu\text{m}). \quad (2)$$

例如 300 K 的物体在 $5\mu\text{m}$ 处有最强的辐射,而接近室温物体的 λ_m 在 $10\mu\text{m}$ 附近.由于常用的光学玻璃的截止频率约为 $3\mu\text{m}$,所以红外测温仪的聚焦镜通常有两类:一类是反射型,如图1所示;另一类是透射型,镜头用晶体材料制成,例如硅、砷化镓等,这些材料在中红外甚至远红外都是透明的^[2].其次,热辐射场一般比较弱,加上红外探测器的灵敏度很低,为了提高灵敏度,聚焦光学系统的孔径都必须做得较大.反射型镜头结构复杂,调节不方便,而短焦距大孔径的晶体透镜厚度很大,不仅重量大,而且价格昂贵,均不能满足新型的测温仪的要求.

近年来,衍射型光学元件 DOE(即二元光学元件 BOE)发展很快^[3,4],其特点如下:(1)容易做到超薄化,集成化;(2)集光特性好,衍射效率高,实现了广角、高数值孔径化;(3)由于采用大规模集成电路制造技术,因而能成批处理,可大量生产,成本低,有均一性.这些特点完全适用于红外检测技术,因而 DOE 已成为红外测温仪新一代的聚焦镜,衍射型微型镜头激光原理如图2所示.

镜头通常用硅作为基本材料,从工作原理

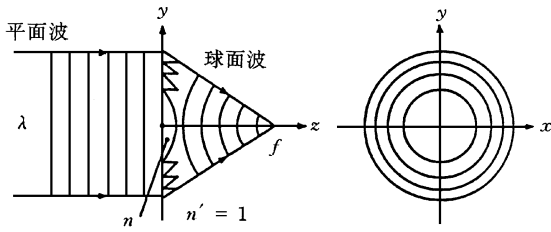


图2 衍射型微型镜头激光原理

上来看,聚焦型 DOE 透镜与传统的菲涅耳透镜相似,它由许多同心的圆环构成,每个圆环在 yz 截面中的图形都是一个小棱镜,把光线折射射向共同的焦点.为了适应于半导体集成电路的制作工艺,棱镜的斜面(实际上是曲面而不是平面)制成 2^N 个台阶 ($N \geq 3$),形成锯齿状.锯齿形进一步简化为内接齿形的台阶形.随着 N 的扩大,焦点处光斑变小,衍射效率提高.一般 $N = 4$ 时,可达到衍射效率的 81%,用在红外检测仪中已足够.

一个典型的红外检测仪用超小型 DOE 的规格如表 2 所示.

表 2 红外检测仪用 DOE 透镜规格

入射波长	焦距	直径	NA	刻蚀等级	厚度
$10\mu\text{m}$	3mm	2.2mm	0.34	$N = 2, 4$	0.3mm

由于硅的折射率约为 3.4,加工深度较小,刻蚀时间较短,容易正确控制截面的形状.

总的来说,采用 DOE 元件作为聚光镜是红外测温仪迈向小型化和超小型化的重要步骤.

3 薄膜型红外探测器

除了上面讲到的红外探测列阵 (IRCCD) 以外,红外传感器还有量子型传感器和热电型传感器两大类.

量子型传感器按动作和元件构造可分为以下 4 类:光导型 (photoconductive)、光电动势型 (photovoltaic)、MIS 型和肖特基型 (Schottky diode).

红外测温仪常用的是热电型传感器,通常用的材料一般都是用钽酸锂、陶瓷等材料制成.这一类传感器有以下缺点:(1) 由于电容的限

制,探测的受光面积有限;(2) 为防止热的交调失真,各元件间必须保持一定的间隔,因此体积难以缩小;(3) 由于热容量较大,因此热响应速度很低,通常响应时间为 50—100ms 以上;(4) 稳定性、测量重复性均不理想.

热电型传感器的工作原理是热释电效应^[5],该效应主要是在热电介质的表面进行的,因此,近年来薄膜型传感器备受关注.1997 年,日本松下电气公司率先应用磁控管喷镀技术,在 MgO 单晶体上喷镀 $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x\text{Ti}_{1-x/4}\text{O}_3$ (简称 PLT) 薄膜而制成红外传感器.

薄膜型红外传感器构造如图 3 所示.在 MgO 单结晶板上,Pt 是下层电极,NiCr 是作为红外吸收膜的上层电极,PLT 是热电薄膜.红外检测部分是由聚酰亚胺树脂和 Pt 电极所构成.红外检测部下方的微型空槽,用光刻法形成(称 MgO 微型机械加工技术).有了这个构造,能使元件的热容量变小,热响应加快,能控制向基板的热扩散,实现基板的高灵敏度化和小型化.薄膜的厚度仅在 $2\mu\text{m}$ 以内,红外检测部的面积虽然很小,但是有足够的电容量.

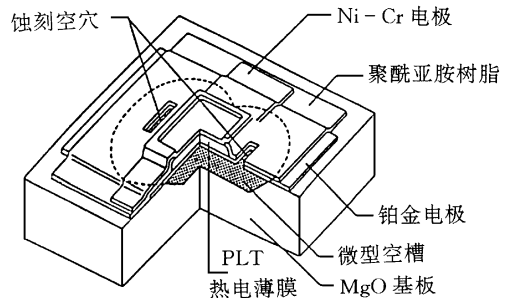


图3 薄膜型红外传感器

薄膜化是红外传感器实现探测器小型化、微型化的第二个重要因素,与此同时还提高了系统的响应速度和灵敏度.

4 结构新颖的共振型压电调制器

调制器又称斩波器,一般用步进电机或用振动片做成.

步进电机用作斩波器有如下缺点:步进电机的体积比较大,需要一套驱动回路.电机会发

热,驱动回路发出的脉冲信号成为一种噪声,热噪声本底和脉冲信号的噪声均会影响检测精度。

用振动片制成的斩波器构造简单,发热小,克服了上述缺点。但是要得到较大的振幅,其长度也很可观,而且驱动电压也比较高。松下电子公司对上述振动片作了改进,设计了一种 W 共振型压电调节器,其形状如图 4 所示。它分为驱动部和振动放大部。驱动部(图 4 的上部)的末端固定,在弹性金属上再固定有经过分极处理的压电体金属薄板,加上一定频率的电磁场使之振动。振动放大部经过 3 次 90 度的曲折,它的最前端能作振幅较大的振动。

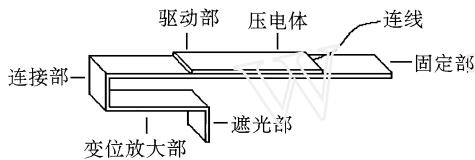


图 4 W 共振型压电调节器

驱动部与放大部的共振频率是不同的。设驱动部的共振频率为 f_1 , 放大部的共振频率为 f_2 , 让频率在 f_1 与 f_2 之间变化。取某个值的时候,振幅会因相互抵消而变小。因此,取一个合适的频率值,则不但能得到最大的振幅,而且能保持稳定,这就叫做 W 共振型。

图 5 是三种频率的动作图,其中(a)的频率接近 f_1 , (c)的频率接近 f_2 , 两者的结果,虽然放大部的振幅很大,但驱动部的振幅也很大。

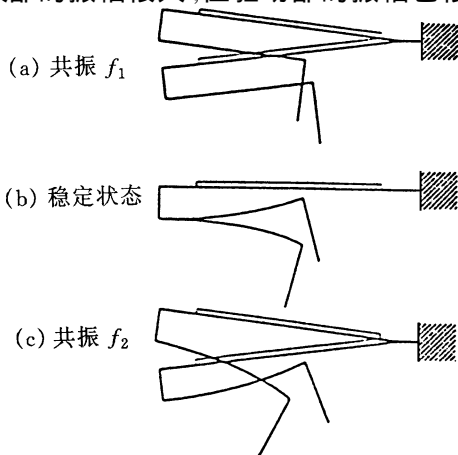


图 5 三种频率的动作图

图 5(b) 选择一个稳定的状态,从图中可以看出,放大部的振幅仍很大,而驱动部的振幅却非常小,这不但使得振动片的使用寿命大大延长,而且体积只有一般振动片的一半。由于传感器的改进,其响应变快,因此,这个振动片的频率取值为 85 Hz,使得采样周期接近 10ms,达到了超小型、高灵敏度、快速测定的目标。这样一来,系统的三个主要部件的小型化、超小型化的目标就全部实现了。

5 微型红外传感器的特性

一个用衍射光学微聚焦镜、W 型光调制器和薄膜型探测器构成的红外测温系统只有一个大功率晶体管那么大,完全实现了微型化的目标。这种微型的红外测温器件通常不再称作红外测温仪,而称为微型红外传感器,它具有下面的特性。

5.1 电气特性

传感器的窗用 $5\mu\text{m}$ 截止波长的滤镜,用硅板作为密封外壳,其典型特性如下:外壳尺寸为 $= 5\text{mm}$;受光面积为 $0.24\text{mm} \times 0.24\text{mm}$;波长范围为 $5 \sim 14\mu\text{m}$;电压灵敏度 $R_v(500, 10)$ 为 $2400/\text{VW}$;探测率 $D^*(500, 10, 1)$ 为 $1.9 \times 10^8 \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$; $NEP(500, 10, 1)$ 为 $1.3 \times 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$;上升时间约为 10ms。

在图 6 中,将常用的陶瓷型红外传感器的特性与薄膜型传感器进行了比较。在低频附近,两者比较接近;而在高频处,薄膜型传感器不但输出电压 V_p 增大,而且探测率 D^* 也在大范围内超过陶瓷红外线传感器。由此可知,用新型传感器,不但可以做到小型化,而且性能提高了。在响应时间方面,薄膜型传感器仅为陶瓷型的 1/10,这样,就可以做到高速度、高精度地进行非接触式温度检测。

热电型传感器因为有压电特性,对于外部的振动,也会发出压电信号,成为噪声,引起误差。但是,薄膜型传感器在很大的频率范围内几乎不发生噪声。这是因为传感器的检测部分用聚酰亚胺树脂使其固定在内部空间,外部的振

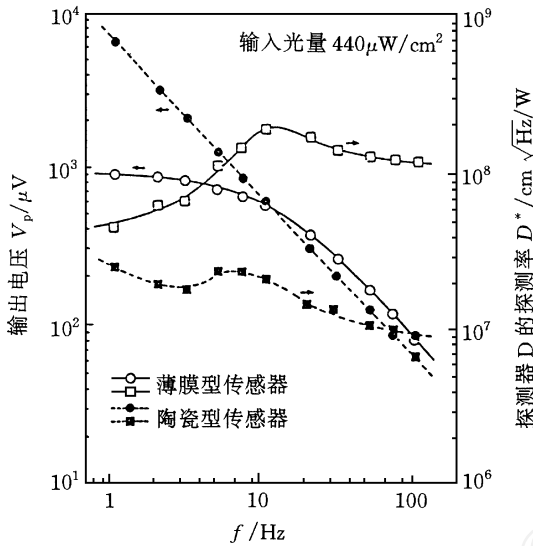


图6 陶瓷型和薄膜型传感器的特性

动无法传进来,再加上质量轻,共振的频率高,因此能耐噪声。

当外部的环境温度(室内温度)发生急剧变化时,也会产生热电电流而形成噪声。但是薄膜型传感器的 MgO 基板是用吸热材料做成的,而且聚酰亚胺树脂的热传导系数也很小,因此,环境温度的急剧变化也不会带来影响。

综上所述,微型薄膜型传感器是一种高性能的传感器,其高灵敏度、防噪声、快速检测等特性使其应用范围得到很大扩展。

5.2 光学特性

图7是衍射型微型镜的灵敏度的角分布特性,分为 $N=2$, $N=4$ 相位和没有镜头3种情况。2相位、4相位的相对灵敏度与没有镜头的

情况相比,分别为5倍和10倍。由此可见,DOE镜头具有良好的集光特性。

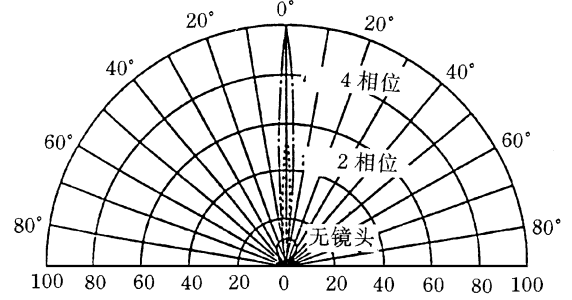


图7 衍射镜灵敏度角分布特性

微型红外探测器的主要性能指标如下:检测频率为 85Hz;电源电压为 4.5—12V;波长范围为 7—14μm;灵敏度 ($T_b = 37$) 为 $20_{type} \mu V_{p-p} / \text{deg}$;噪声为 $0.23_{type} \mu V_{p-p} / \sqrt{\text{Hz}}$;尺寸为 21.5cm × 12.6cm × 8.1cm。

传感器的薄膜化技术加上光学系统的改进和斩波器的更新,红外测温系统已经从仪器级发展成为器件级,实现了超小型、高灵敏度、快速响应以及低成本的目标,应用范围将变得更加广阔。

参 考 文 献

- [1] Kawaguri M, Hashimoto K, Morinaka K *et al.* National Tech. Report, 1997, 43(4): 423—430
- [2] 宋雪君,杨颜峰. 物理, 1995, 24: 417—423
- [3] 陈岩松. 物理, 1992, 21: 197—200
- [4] 杨国桢,顾本源. 物理, 1994, 23: 200—205
- [5] Nomura K, Masutani T, Kotani T *et al.* National Tech. Report, 1997, 43(4): 412—422

集成电路铜连线技术*

徐毓龙 周晓华 徐玉成

(西安电子科技大学 西安 710071)

摘 要 简要介绍了集成电路铜连线技术及其应用。

关键词 铜连线技术, 低介电常数介质, RC 时间常数

* 1998 - 08 - 27 收到初稿, 1998 - 11 - 10 修回