

敏感技术物理及应用专题系列(II)

固态传感器¹⁾

鲍敏杭

(复旦大学电子工程系)

大规模集成电路使人类社会进入了微电子化、自动化和信息化的新时代。这一时代的特点是信息处理能力极强的微型计算机普及应用。相比之下,作为信息采集手段的传感器就显得落后,很不适应。在客观需要的推动下,从70年代后期以来,在全世界范围内出现了发展传感器的热潮,这一热潮的主要特点就是研制各种以固体物性原理为基础的固态传感器(或称为物性型传感器),以与飞速发展的固态微电子技术相适应。这一发展阶段的历史还不长,但进展却十分惊人,各种新型的传感器已大量出现,它不仅提高了传统的结构型传感器在机械量等方面的测量水平,而且在物理量和化学量的测量方面也开拓了新的领域。

在固态传感器的研制中,人们利用固态材料的力、磁、热、光、电等方面的物理效应已经研制出品种繁多的传感器。物理知识,特别是固态物理学知识是发展传感器的珍贵知识宝库。

一、固态磁敏传感器

1. 霍耳传感器

美国学者霍耳在1879年发现^[1],当通电的矩形金属片置于与之垂直的磁场中时,金属中将出现与电流方向相垂直的电场,即在金属片的横向建立起与电流强度和与磁感应强度成比例的电压。这一起源于洛伦兹力的物理现象称为霍耳效应。显然,利用霍耳效应可以制成检测磁场的传感器。但是,由于金属中的霍耳效应十分微弱,一般还不到 $1\mu\text{V}$,因此长期以来,霍耳

效应仅仅是一种物理现象,没有什么实用价值。在本世纪中,人们发现利用半导体材料制作的霍耳器件可以输出高达几十mV的信号。70年代,将霍耳器件与放大电路、斯密特触发电路、输出驱动电路等单块集成在一块硅芯片上,生产出使用十分方便的霍耳集成传感器^[2]。至1979年,即霍耳效应发现100周年时,已生产并使用的霍耳集成电路已有几亿只,分立元件的霍耳传感器更是不计其数。

与感应线圈式磁传感器相比,半导体霍耳传感器的特点是小型、灵敏,能检测静磁场,因此使用十分广泛。它除用于磁场测量、电流测量外,还用于检测磁带上记录信号的磁读头之中,用量十分惊人。霍耳传感器还经常与一个永磁体配合使用,例如制成计算机的键盘开关和机械设备上的限位开关。此外,利用霍耳传感器制成无刷电动机,这种电动机寿命长,噪声低,并可实现电子调速,在高级录音和录象设备中有广泛的应用。

2. 磁阻器件

许多固体材料的电阻率随着磁场的强度或方向的变化而变化,这一现象称为磁阻效应。利用磁阻效应可以制成具有磁敏性的磁阻器件。常见的磁阻器件有两类:一类是用高迁移率的半导体(如铟化镓)薄膜等材料制作的^[3]。用的时候一般采用与电流相垂直的磁场,其电阻的变化量与磁场强度的平方成比例。另一类是用

1) 本刊1989年第2期发表的关定华的《敏感材料和固态传感器的发展》一文是本专题系列的第一篇——编者注。

磁性金属薄膜材料(如铁钴镍合金)制成的。应用时,磁场常在器件平面内,对一定的磁场强度,器件的电阻值与磁场的方向有关。在磁场平行于电流方向时,电阻 R_1 最大;当磁场与电流方向垂直时,电阻 R_2 最小。在磁场与电阻夹角为 θ 的一般情况下,电阻值 $R(\theta)$ 由下式决定:

$$R(\theta) = R_1 \cos^2 \theta + R_2 \sin^2 \theta. \quad (1)$$

可见,利用磁阻效应可以检测磁场的大小,也可以检测磁场的方向。与霍尔器件相比,磁阻器件的灵敏度较高,但线性较差,与集成电路的结合也较困难。

3. 超导磁敏传感器

在对超导现象的研究中,人们发现,当超导-绝缘层-超导结(SIS结)的中介绝缘层很薄(例如1nm左右)时,由于超导电子对进入绝缘层,使这种SIS结也具有超导性。但是,这种超导现象只在电流小于某一临界电流 I_c 时才出现,而临界电流 I_c 有随着磁场灵敏地起伏变化的性质,其变化周期为 $1.25 \times 10^{-4} \text{T}$ (磁量子)。利用这一效应,可以测量磁场,其分辨率约为 10^{-6}T 。为了进一步提高测量灵敏度,人们把二个这样的SIS结并联,构成一个有二个绝缘薄层

的超导环,如图1(a)所示。由于二支SIS结电流之间的干涉作用,临界电流 I_c 随磁场强度的变化就更加灵敏,周期缩短到 10^{-6}T ,如图1(b)所示。配合适当的外电路后,分辨率可达到 10^{-10}T 左右。这种器件称为超导量子干涉器件(SQUID)^[4],可用于测量微弱磁场的变化,如生物体的心磁场、脑磁场等。过去,由于超导量子干涉器件要在接近0K的低温条件下工作,所以难以推广。近年来,高温超导的研究获得了巨大进展,超导温度提高到了液氮温度,并很快研制成功了高温的超导量子器件,这为推广应用创造了很好的条件。

固态磁敏器件,除以上介绍的几种之外,还有磁敏二极管、磁敏三极管、磁敏MOS器件等。

二、固态力敏传感器

1. 力敏应变电阻

在应力作用下,阻值会发生变化的电阻称为应变电阻,主要有两类:金属应变电阻和半导体应变电阻。

金属应变电阻可以用金属丝绕制而成,也可以用很薄的金属箔刻蚀而成。当它沿电阻方向受力时,电阻条变长而截面减小,使阻值增大。由于金属丝或箔本身的强度很低,为适应各种大小负荷的测量要求,一般是将金属电阻制作在薄的绝缘基片上(称为应变片)。根据被测力的大小和特点,首先设计出各种机械构件,然后把应变片粘贴在这些构件的特定部位。当这些构件受力时,贴片的部位出现一定的应变,进而引起应变电阻的阻值变化。由于金属应变电阻的阻值变化很小,因此信号较弱。为了减小干扰、提高稳定性,一般用二对变化方向相反的力敏电阻构成全桥,以获得平衡输出。利用机械结构的办法有很大的灵活性,可以使测力的量程扩大。

半导体压阻效应是C. S. Smith在1954年发现的^[5]。他分析和测定了锗、硅等半导体材料的电阻率随应力的变化特性,发现半导体

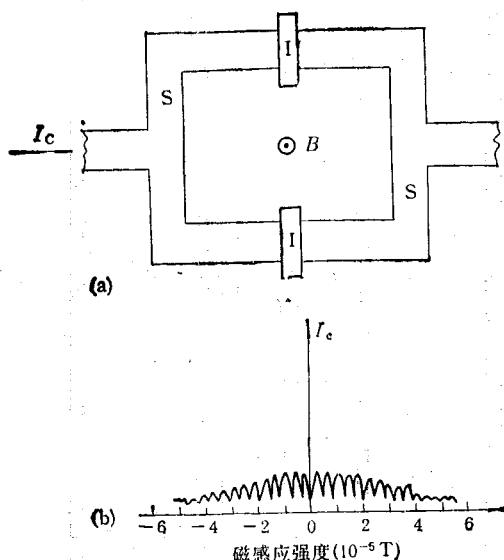


图1 超导量子干涉器件

(a) 结构示意图; (b) 临界电流与磁场关系

的电阻率的变化比金属电阻的变化大出上百倍。

半导体压阻效应的原理与金属应变电阻的原理完全不同。金属应变电阻阻值的变化是电阻的几何尺寸的变化引起的，而半导体压阻效应是由于应力引起载流子迁移率的变化而引起的，它的起源要用固体能带论来解释。

n型硅中的导电电子是分布在能量相等的六个能带极小值附近的状况中的，这六个能量极小分布在 k 空间（动量空间）的三个主坐标轴上，与晶体具有同样的立方对称性。由于极值附近的等能面是旋转椭球面，因而电子的电导迁移率不是各向同性的。在 k_x 轴上的极小中，电子沿 x 方向的迁移率小，只有垂直于 x 方向的五分之一。 k_y 和 k_z 轴上的极小也有类似的情况，即在沿着所在轴方向的迁移率比沿垂直方向的迁移率小得多。在正常情况下，由于导电电子在六个极小中均匀分布，总的电子平均迁移率表现出各向同性的效果。但是，当晶体受力形变时，晶体的原有对称性受到破坏，六个能量极小的能量值相对地升降而不再相等，使某些极小附近的电子数比另一些极小附近的电子数多些，这样，平均电子迁移率就不再各向同性了。沿某些方向变大，沿另一些方向变小，变化幅度远大于金属应变片的电阻变化。

利用半导体压阻效应可以制成半导体应变片，它的优点是灵敏度高，但存在温度系数大的缺点。因此，在特别注重温度稳定性的力传感器中，仍以使用金属应变片为主。

2. 全桥集成硅压力传感器

半导体压阻效应的一个主要应用，是制作单块集成的全桥式硅压力传感器^[6]，用于测量流体压强。这种压力传感器有很大的优越性，已得到广泛应用，成为当前压力传感器的主流。

单块集成的硅压力传感器制作：利用硅材料作成弹性体，它一般是带厚环的硅膜。压阻全桥可通过氧化、光刻扩散等平面工艺直接制作在硅膜上的适当位置，图2是一个硅压力传感器的结构示意图。当硅膜两边受到压差 P

时，电阻 R_1 、 R_4 和 R_2 、 R_3 的阻值反向变化，压阻全桥就输出与压力 P 成比例的电压。由于硅的机械性能优良，全桥的平衡作用大大地减小了温度效应。此外，它还具有微小化和批量生产成本低等优点。

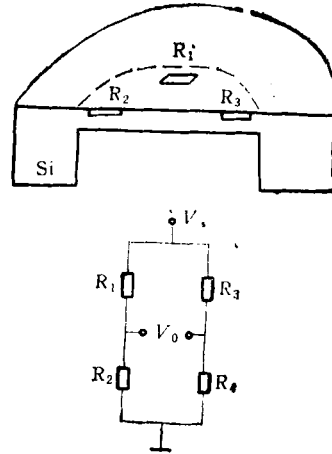


图2 单块硅压力传感器

根据压阻效应的基本原理，还可以用一个四端电阻^[7]代替由四个电阻构成的全桥。当有应力时，固体中电阻率呈各向异性，因此存在由 x 向电流产生 y 向电场的可能。利用这一特性，在硅膜上制成如图3所示的四端电阻，只要在电极1和2之间加上电压，以产生 x 向的电流，在存在应力时， x 向的电流引起 y 向的电场，在电极3和4上形成与压力成比例的电压，四端电阻的尺寸更小，温差引起的失调和漂移也小，故性能更好。

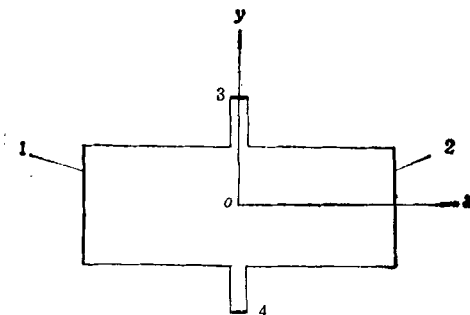


图3 四端元件的力敏电阻

压力传感器在工业自动控制、航空、医学和汽车工业中有广泛应用，已成为固态传感器的最重要产品之一。

3. 固态压电传感器

某些晶体(如石英)具有压电性质,即在压力作用下,晶体中会产生电极化而形成面电荷。除晶体外,一些陶瓷材料(如钛酸钡)和有机高分子聚合物(如聚偏氟乙稀——PVDF)也具有压电性质。利用固态材料的压电效应可将力转换成电信号,制成压电式力传感器或加速度计。由于压电效应产生的极化电荷量很小,且具有静电性质,难以长时间维持,因此这类传感器比较适合于检测动态的信号。

三、固态光电传感器^[8]

1. 半导体光敏电阻

根据固态能带论,半导体中的导带电子和价带空穴可以导电。当光照射在半导体上时,只要入射光子的能量比禁带宽度大,就能够把价带中的电子激发到导带,同时形成一个价带空穴和一个导带电子。这些光照产生的附加电子和空穴造成了附加的电导,使电阻率下降,这种现象称为光电导。由于光透入固体材料的深度有限,因此光电导现象在薄膜电阻中比较显著。利用光电导效应制成的光敏电阻是一种十分灵敏的光传感器。选择具有适当的禁带宽度的材料,可以使光敏电阻的光谱响应落在一定的波长范围内,以满足不同应用的需要。例如,利用光谱响应曲线与人眼相近的光敏电阻,来控制照相机的自动曝光系统。

2. 光电二极管和三极管

p-n 结二极管是半导体器件的基本组成部分。由于在 p 型半导体和 n 型半导体的界面附近,电子空穴重新平衡分布,因此在结区附近形成了从 n 区指向 p 区的内建电场。当光照在 p-n 结区及其附近产生电子空穴对时,在内建电场的作用下,电子移向 n 区,空穴移向 p 区。如果 p 区和 n 区之间没有外电路相通,则光照的结果将建立起一个 p 正 n 负的附加电势差。如果有外电路将 p 区和 n 区短接,或在 p-n 结上加有 n 正 p 负的反向电压,那么光照就可以使外电路中出现与人射光强成比例的光生

电流。利用上述效应,可以将 p-n 结二极管作为测光用传感器,通常称为光电二极管。当然,专供测光用的二极管,在设计上和工艺上,与一般整流用的二极管有一定的差别。

把光电二极管与双极型晶体三极管的结构结合起来,还可以将光生电流放大,做成灵敏度很高的光电三极管或光电达林顿管。光电二极管或光电三极管在使用时往往需要有一定的光源配合,为此又出现了把发光二极管(LED)和光电二极管、光电三极管或其他电路混合集成在一起的光电耦合器。

光电二极管、三极管及各种各样的光电耦合器件,在通信技术、工业自动控制、家用电器、玩具中都有广泛的应用。

3. 电荷耦合图象传感器^[9]

光电二极管和三极管可以看作是利用双极管半导体器件的光电传感器。此外,也有利用 MOS 器件结构的光电传感器,这就是固态传感器(也是所有传感器)中集成规模最大的电荷耦合图象传感器(CCD)。这种器件利用 MOS 结构的深耗尽区收集和存储光电子或空穴,并利用载流子在相邻势阱中转移的办法来进行信号传递。

电荷耦合器件有线阵和面阵两大类。线阵器件由大量直线排列的 CCD 单元组成,用于一维图象信号检测。如果将它装在飞机或人造卫星上,则利用器件的运动作为横向扫描,就可以实现平面摄影。目前,线阵 CCD 规模已达到几千个象素(一个象素对应 3 个 MOS 结构)。面阵 CCD 可直接实现二维图象检测,十分有用。它除了广泛用于各种摄影系统之外,还用作机器人视觉传感器。目前,面阵 CCD 的规模极大,已达到几十万象素,可满足一般的电视摄影的需要。

四、固态热敏传感器

1. 热敏电阻

许多氧化物半导体或陶瓷材料的电阻率随温度灵敏地变化,利用这一效应可以制成对温

度敏感的热敏电阻. 固态热敏电阻具有尺寸小、价格低和使用温度范围广等优点.

热敏电阻有负温度系数 (NTC) 和正温度系数 (PTC) 等几种类型. 负温度系数的热敏电阻由锰、镍、铬等材料的氧化物制成. 因为载流子浓度随温度上升而上升, 所以电阻下降. NTC 热敏电阻除用于测温之外, 还用作补偿元件. PTC 热敏电阻由钛酸钡等铁电材料制成. 在居里点附近, 这种材料的相变使电阻随温度上升急剧变化 (达几个数量级). 钛酸钡的居里点为 120°C , 其他铁电材料有不同的居里温度. 在 PTC 热敏电阻上加上一定的电压后, 开始时, 因在室温下, 电阻阻值较小, 所以有较大的电流流过, 随着电阻上的功耗增大, 电阻的温度上升, 电阻值很快上升, 使电流降到一个很小的值——维持电流. 这种特性的一个典型应用是, 在电视机开机时产生瞬时的消磁电流.

2. 热电堆

利用光产生热的效果和温差电效应, 制成的传感器可以间接地测量光能, 这种传感器利用热电偶工作. 为了提高探测灵敏度, 常将由金属或半导体构成的许多热电偶串接起来, 所有热端集中在一个薄硅膜的中心, 上面覆盖铂黑等吸收材料, 以更有效地吸收辐射能. 热电偶的冷端置于膜周围的厚硅环上. 利用辐照引起的温差产生温差电动势, 可以检测辐射的功率. 这种探测器的功能和被测光的波长无关,

特别适合于红外线的探测.

3. 热电传感器

有些固体材料会因温度变化而产生电极化现象, 这种现象称为热电效应. 利用热电效应可以探测红外辐射引起的热效应. 这种传感器所测量的也是辐射的功率, 与波长无关. 但是, 为了防止环境杂散光的影响, 常采用以一定的频率调制的光源, 然后从输出中检出该频率的信号.

除以上介绍的传感器外, 还有许多其他类型固态传感器, 应用也十分广泛, 例如对电压敏感的电压敏电阻, 对湿度敏感的湿敏电阻和湿敏电容, 对某些气体成分敏感的气敏传感器, 对离子敏感的离子敏传感器等. 这些传感器也都利用固体材料的物性原理, 由于篇幅有限, 本文未作介绍.

- [1] E. H. 普特来著, 傅德冲译, 霍耳效应及有关现象, 上海科技出版社, (1964).
- [2] 鲍敏杭、吴宪平著, 集成传感器, 国防工业出版社, (1987).
- [3] 王文生等, 传感技术学报, 1-2(1988), 41.
- [4] 章立源著, 超导体, 科学出版社, (1982).
- [5] C. S. Smith *Phys. Rev.*, **94** (1954), 42.
- [6] O. N. Tufte et al., *J. Appl. Phys.*, **33** (1962), 3322.
- [7] 鲍敏杭、王言, 复旦大学学报(自然科学版), **24**(1985), 315.
- [8] 谷善平, 光センサ, 电子材料(日), **17-8**(1978), 65.
- [9] C. H. Sequin and M. F. Tompsett, *Charge Transfer Devices*, Academic Press Inc., (1975).

珍藏月球宝藏的二十年

1989年7月是人类首次登月的20周年. 阿波罗宇宙飞船共采集了382kg月球岩石. 它们共计有2196组编号的样品, 并被再分成约7万块样品, 其中有56000块已被拿去进行过研究. 由于样品制备极其仔细, 采用了许多非破坏性试验以及灵敏度很高的现代分析技术, 使得这些岩石样品只损耗了2%. 从这样小的损耗中科学家获取了关于月球的大量知识: 月球和地球、陨星一样老; 它是在干燥条件下形成的, 并且曾经有过较强磁场; 月球很早就成为层状结构; 在39亿年前, 它曾被陨星猛烈冲撞过; 它缺乏亲铁元素等. 迄今的研究并未得到所有问题的答案, 例如月球为什么存在, 就是一个长期未解决的问题.

余下的98%的月球岩石样品至少足以提供今后

20年内关于月球起源和演化的进一步研究之用. 这些样品被置于纯净而干燥的氮气中, 分别保存在休斯顿和圣安东尼奥的两处有极其严密安全措施的地地下室里. 每年有700至900件月球岩石样品(其中大多数仅有几毫克)被送往65个活跃在月球研究领域的单位, 去进行研究.

研究月球岩石样品所发展起来的储存、处理和样品制备技术, 已被应用到从南极收集到的陨石和平流层收集到的行星际尘埃上. 人们还一直希望发射一颗通过月球极点的卫星, 它有可能把月球岩石从阿波罗获得的局域样品扩大到整个月球.

(邓祖淦根据 Science 1989年 第243卷
第1552页编译)