

# 电子隧道传感器的原理、现状与发展

龙志峰 薛实福 李庆祥

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

**摘要** 电子隧道传感器应用电子隧道原理对位移进行检测,结构简单,能耗低,它具有很高的灵敏度,并且不受尺寸限制,在微型化和集成化方面显示了良好的前景,各国科学家对电子隧道传感器进行了广泛的研究并制成了加速度计,红外探测器,磁强计,触觉传感器,这些传感器小巧且性能优异。本文介绍了电子隧道原理,对电子隧道传感器的结构和性能进行了描述,并讨论了电子隧道传感器的发展前景。

**关键词** 隧道 加速度计 红外探测器 磁强计 触觉传感器

## 1 引言

传感技术在机械工业、航空航天、生命科学、军事等领域有着广泛的应用,随着这些领域的进一步发展,对传感技术提出了更高的要求,其中包括传感器的微型化、集成化,同时要求其精度高、能耗低、成本低。从八十年代中期开始,将扫描隧道显微镜的电子隧道原理,应用于传感器设计;同期微电子机械系统技术的发展有力支持了传感器的微型化、集成化。以美国为代表,开发和制成了基于电子隧道原理的微型加速度计<sup>[1-3]</sup>、红外探测器<sup>[2-5]</sup>、磁强计<sup>[6]</sup>、触觉传感器。电子隧道传感器具有灵敏度高、体积小、能耗低、易集成的特点,有着良好的科研和实用前景。

## 2 电子隧道传感器的原理

电子隧道传感器的原理是建立在隧道效应的基础上的,当两个电极非常接近时,在外加电场的作用下,形成隧道<sup>[3]</sup>:

$$I = V_b \exp(-A \sqrt{\Phi} S) \quad (1)$$

式中,  $V_b$ : 电极间偏置电压;  $\Phi$ : 有效势垒高度;  $S$ : 电极间隙;  $A$ : 常数 ( $A = 1.025eV^{-1/2} \text{Å}^{-1}$ )

其中  $V_b < \Phi e$

由(1)式可见,隧道电流  $I$  与电极间隙  $S$  成负指数关系。

当电子隧道传感器的传感元件位置发生变化时,将引起隧道电流的变化。通过对隧道电流进行检测或对隧道间隙进行反馈控制,可以检测加速度、红外辐射、磁场等物理量,并能获得很高的灵敏度。

由于电子隧道传感器的灵敏度与几何尺寸无直接关系,因而不存在随着尺寸微型化,灵敏度大大下降的问题。这一优点为传感器技术的发展开创了一个崭新的领域。

### 3 电子隧道传感器的现状

#### (1) 加速度计

八十年代末,美国的 S. B. Waltman 和 W. J. Kaiser 研制了基于隧道原理的加速度计<sup>[1]</sup>。其原理如图 1 所示。

该加速度计采用金作为电极材料。两电极上加载有 30 ~ 100mV 的偏压。双压电晶体驱动器使悬梁发生弯曲变形,悬梁上的电极与对应电极间的隧道间隙不断减少,直至隧道电流达到预设值(0.1 ~ 1.0nA),从而进入工作状态。在工作过程中,隧道间隙(电流)的变化将导致反馈控制电路输出到双压电晶体驱动器上的驱动电压发生变化,保持隧道电流稳定,记录驱动电压,即可检测外界加速度。

在这一隧道加速度计中,若势垒高度  $\Phi$  为 1eV,当电流信号变化 0.5% 时,由(1)可知,对应的电极间隙变化为  $5 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ ,代表加速度变化量  $10 \mu\text{g}$ <sup>[2]</sup>;而电容微加速度计中<sup>[8]</sup>,电容信号变化 0.5%,其对应的极板间隙变化为 680 \text{ \AA},代表加速度变化 1g。同一加速度变化量所对应的检测信号变化量,隧道加速度计比电容加速度计大几个数量级,具有明显的优越性。

九十年代初, T. W. Kenny 和 W. J. Kaiser 设计了一种以硅为基体材料的微加速度计<sup>[2]</sup>,其原理如图 2 所示。

这一电子隧道加速度计的特点是:隧道电极的相对位置由静电致动器控制,从而克服了压电致动时的热漂移、迟滞和蠕变的影响。静电致动与压电致动相比,在工作带宽,动态特性和动作精度上具有明显优势。

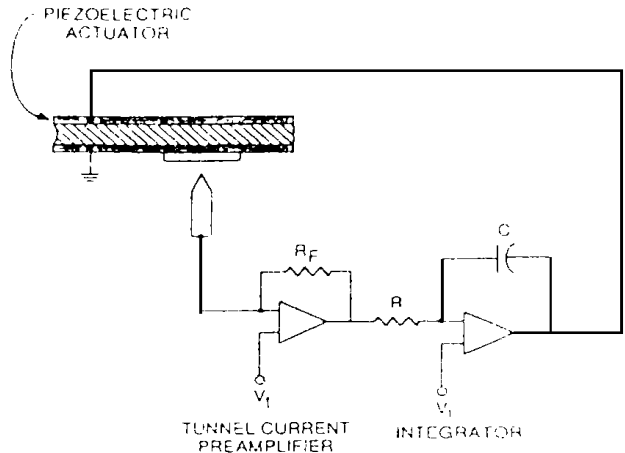


Fig. 1 Schematic diagram of the tunnel sensor system

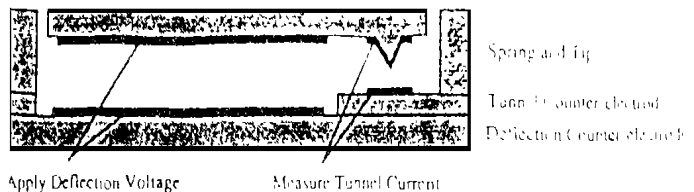


Fig. 2 Schematic diagram of prototype tunnel accelerometer

该电子隧道加速度计势垒高度为  $0.5\text{eV}$ , 隧道工作电流约为  $1.35\text{nA}$ , 电流对间隙的响应为  $0.94\text{nA}/\text{\AA}$ , 传感元件的固有频率为  $200\text{Hz}$ , 当工作于这一频率以下时, 电流对加速度的响应为  $3 \times 10^{-5}\text{A/g}$ , 加速度计的灵敏度在  $10\text{Hz}$  时为  $1 \times 10^{-7}\text{g/Hz}^{1/2}$ 。这一灵敏度比普通微加速度计高几个数量级, 其体积和重量比达到这一精度的普通加速度计小几个数量级。

这一加速度计与前述的加速度计一样, 采用的是“力自平衡设计”, 工作时, 致动器给作为传感元件的悬梁施加作用力, 抵消外界振动, 隧道间隙不变, 隧道电流不变。为保证系统稳定, 这一类加速度计的工作频率应低于传感元件的固有频率。传感元件的固有频率仅为  $200\text{Hz}$ , 限制了加速度计的应用。

T. W. Kenny 和 W. J. Kaiser 随后对加速度计的结构作了重大改进<sup>[3]</sup>, 如图 3 所示, 大大提高了传感器的工作频率。

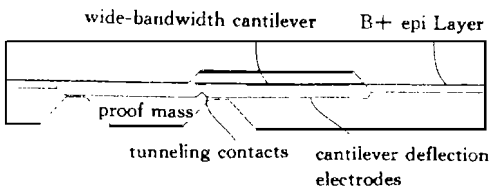


Fig. 3 Schematic diagram of accelerometer with a wide-bandwidth cantilever

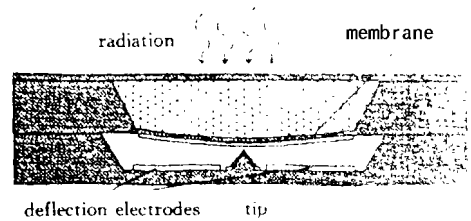


Fig. 4 Schematic diagram of tunnel infrared detector

这一加速度计的特点是采用“跟随设计”, 用于传感的检测质量和用于跟随的悬梁上加工有对应电极, 且分别位于两个元件上, 两元件的机械特性可分别控制并独立加工, 因此又可称为“双元件设计”。工作时, 检测质量获取外界振动, 引起隧道间隙变化, 悬梁在静电致动器驱动下“跟随”检测质量运动, 反馈电路保证了隧道电流的稳定, 记录并分析静电致动电压即可获得加速度信息。

在这一加速度计中, 检测质量尺寸为  $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 200\mu\text{m}$ , 固有频率  $100\text{Hz}$ , 悬梁尺寸为  $0.7\text{mm} \times 0.7\text{mm} \times 4\mu\text{m}$ , 刚性  $17\text{N/m}$ , 固有频率  $37\text{KHz}$ , 这一加速度计对频率低于和高于  $100\text{Hz}$  的加速度信号有良好的响应, 可在很大范围内实现高灵敏度, 其工作频率可达  $5\text{kHz}$  以上, 大大突破了“力自平衡设计”中传感元件固有频率对工作频率的限制。

## (2) 红外探测器

红外探测器是电子隧道传感器的一个重要应用。用隧道结构对传统的戈利盒 (Golay Cell) 的变形进行检测和控制, 使红外探测器技术向前发展了一大步。

T. W. Kenny 和 W. J. Kaiser 等人设计的电子隧道红外探测器<sup>[5]</sup>结构如图 4 所示。

传感器上部是一戈利盒结构。红外辐射被吸收后, 阱内气体发生膨胀。在常温下, 温度每升高  $1\text{K}$ , 体积约变化  $0.3\%$ 。戈利盒阱底的膜片下表面上覆盖有一层金属。同时起到静电电极和隧道电极的作用。底板上分别加工有隧道探针电极和静电电极。工作时, 静电致动器使膜片发生变形, 隧道电极间隙减少直至进入工作状态。在工作过程中, 反馈电路检测并控制隧道电流和隧道间隙保持稳定, 通过记录静电致动器的输出电压, 即可检测红外辐射。

现有加工技术已可使膜片固有频率达  $20\text{kHz}$  以上<sup>[2]</sup>, 因此, 该红外探测器具有良好的动态特性和宽广的频率范围。

这一红外探测器的噪声当量能量 NEP 约为  $2 \sim 4 \times 10^{-10} \text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ 。通过改进红外吸收性能和进一步优化结构, NEP 将降至现在水平的五分之一, 接近其性能极限。

隧道红外探测器有良好的发展前景, 它可被进一步微型化和进行阵列集成、大批量生产。单个探测器的直径已达到  $100 \mu\text{m}$  以下。

### (3) 磁强计

应用隧道原理使磁强计在微型化、低能耗、高精度方面取得了重大进展。

应用隧道原理的磁强计<sup>[6]</sup>结构如图 5 所示。

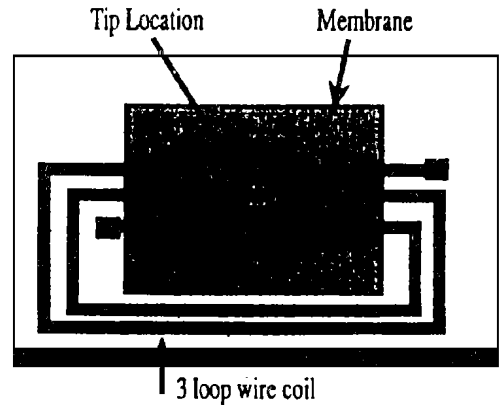
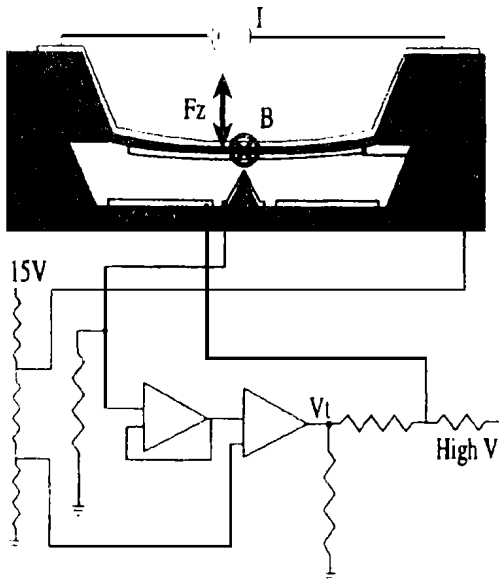


Fig. 5 Schematic diagram of tunnel magnetometer

Fig. 6 Top view of the tunnel magnetometer

其机械结构与红外探测器相似, 但膜片的外表面上加工有螺旋线圈, 如图 6 所示, 当线圈中通过电流时, 电子在磁场作用下产生洛伦兹力, 其合力大小为:

$$F = nLIB \sin \theta \quad (2)$$

式中:  $n$ ——线圈匝数;  $L$ ——膜片上单匝线圈长度;  $I$ ——电流强度;

$B$ ——磁场强度;  $\theta$ ——磁场方向与电流方向的角度。

该磁强计在工作时, 反馈控制电路通过静电致动器使膜片抵消力  $F$  的作用, 位置保持不变, 记录静电致动器的电压, 即可检测力  $F$ 。

通常给螺旋线圈中通入交流电流以便于测量, 为提高检测精度, 交流频率一般取 200Hz 以上。

隧道磁强计性能十分优异, 灵敏度约为  $10^{-9} \text{T esla}/\text{Hz}^{1/2}$ , 工作带宽  $> 10 \text{kHz}$ , 功耗  $< 100 \text{mW}$ , 体积为  $1 \text{cm} \times 1 \text{cm} \times 0.6 \text{mm}$ , 动态范围  $> 100 \text{dB}$ , 温度系数小, 噪声当量磁场强度 (Noise Equivalent magnetic field) NEB 为  $6 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ , 通过增加线圈匝数, 增加膜片面积, 增大电流强度, 提高电流频率等措施, NEB 可降至  $4 \text{nT}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

应用该磁强计测量磁场强度, 可用三个磁强计互相垂直放置, 将三个方向分量合成即可得到磁场的强度及方向。

电子隧道磁强计对直流和交流磁场具有良好的线性响应。

#### (4) 触觉传感器

J. C. Jiang 等人研制开发了一种触觉传感器<sup>71</sup>, 其原理如图 7 所示。

这种触觉传感器是在硅的基体上, 加工出针尖并蒸发上一层金属作为阴极, 针尖半径  $500\text{\AA}$ , 阳极板为  $2\mu\text{m}$  厚的铝片。当阳极板在外来压力作用下产生变形时, 电流将会发生变化。这一传感器的原理与隧道原理不完全一致。J. C. Jiang 设计的这一结构, 阳极板与阴极针尖间隙为  $1000\text{\AA}$ , 极间偏置电压为  $V_b > \Phi/e$ , ( $\Phi$  为势垒高度)。其电流关系不符合式 (1), 未准确得出, 电流大小取决于电压  $V$ , 间隙  $S$ , 势垒  $\Phi$  和探针发射面积  $A$ 。

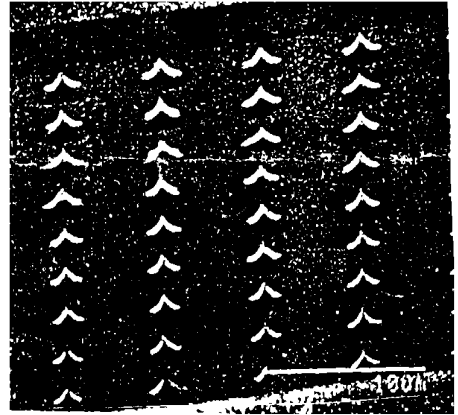
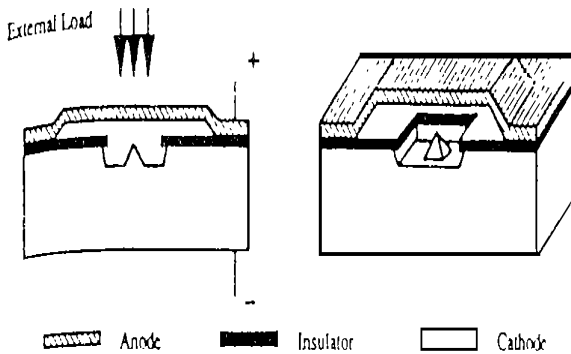


Fig. 7 Schematic diagram of tactile sensor

Fig. 8 Scanning electron micrograph of tip array

这一传感器也可设计成阵列式结构。图 8 为一个  $9 \times 9$  针尖阵列的 SEM 图, 针尖基部为  $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ , 高  $1.8\mu\text{m}$ , 所有针尖共用一阳极膜片, 尺寸为  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 。

这一传感器中不对电极间隙进行反馈控制, 电流通过引出线进行检测。通过调整电极间电压, 以及在加工时改变间隙、针尖发射面积等参数, 可以使电流对作用于阳极上的外界压力产生一个灵敏而强度适当的响应。

## 4 电子隧道传感器的发展方向

### (1) 不断改进传感器结构, 扩大传感器的工作频率范围。

传感器元件的固有频率限制了传感器的工作频率。扩大传感器的工作频率范围, 就必须优化元件设计, 提高其固有频率。在红外探测器和磁强计中, 薄膜的固有频率通过改进设计, 可高达几十千赫兹, 传感器工作频率范围扩展至  $10\text{kHz}$  以上; 加速度传感器由力自平衡式改为跟随式后, 悬梁固有频率达到几十千赫兹, 对致动器具有良好的响应能力, 跟随式加速度计工作频率达到了  $5\text{kHz}$  以上。对传感器结构进行优化, 或改进传感器的结构设计, 进一步扩大传感器的工作频率范围, 仍是今后隧道传感器研究的重要方向。

### (2) 研究和改进电子隧道传感器的加工工艺。

电子隧道传感器的发展离不开微电子机械系统技术的支持, 随着隧道传感器应用领域的不断拓展和传感器性能要求的不断提高, 对传感器的加工和装配都提出了新的要求。微电子机械系统技术是隧道传感器微型化、集成化、实现低成本大批量生产从而实用化的基本保证。在

研究隧道传感器结构和性能的同时,应着手对其加工工艺进行研究。

### (3) 研究隧道传感器的低频应用。

当前对隧道传感器的研究,主要是针对几赫兹以上直至几十千赫兹的频率范围的应用。由于隧道探针针尖上的原子迁移现象等原因,影响了隧道装置的稳定,导致隧道传感器输出信号的低频漂移。对这一现象进行研究,寻求合理的结构设计和处理方案,以便将隧道传感器的优异的灵敏度性能引入到低频测试中,必将会成为今后的一下重要研究方向。

### (4) 拓展新的应用领域。

隧道传感器在加速度、红外辐射、磁场强度等物理量的测量方面已取得了很大进展并产生了诸多成果。在今后的研究工作中,新的应用领域将会得到开发,如压力测量、声音采集、应力检测等。对新的应用领域的研究将使电子隧道传感器的科研和实用前景得到拓展。

## 参 考 文 献

- 1 Waltman S B, Kaiser W J. An electron tunneling sensor. *Sensors & Actuators*, 1989, 19: 201 ~ 210
- 2 Kenny T W, Kaiser W J. Micromachined tunneling displacement transducers for physical sensors. *Journal of Vacuum Sciences Technology A*, 1993, 11(4): 797 ~ 802
- 3 Kenny T W, Kaiser W J. Wide-bandwidth electromechanical actuators for tunneling displacement transducers. *Journal of Micro Electro Mechanical System*, 1994, 3(4): 97 ~ 103
- 4 Kenny T W, Kaiser W J. Micromachined infrared sensors using tunneling displacement transducers. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67(1): 112 ~ 128
- 5 Kenny T W, Kaiser W J. Micromachined electron tunneling infrared sensors. *IEEE*, 1992. 174
- 6 Miller L M, Podosek J A. A  $\mu$ -magnetometer based on electron tunneling. *IEEE*. 467 ~ 472
- 7 Jiang J C, Faynberg V. Fabrication of micromachined silicon tip transducer for tactile sensing. *J Vac Sci Technol*. 1993, B11(6): 1962 ~ 1967
- 8 Peterson K E, Shartel A. Micromechanical accelerometer integrated with CMOS detection circuitry. *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, ED- 29: (23): 2125 ~ 2132

## Electron Tunnel Sensor Principles, Present Situation and Prospect

LONG Zhi-Feng, XUE Shi-Fu, LI Qing-Xiang

(*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084*)

### Abstract

A new class sensors based on electron tunneling effect are used to detect position. The device has a compact mechanical structure and novel sensitivity that will not decrease with the scales, and can be easily operated. Accelerometers, infrared detectors, magnetometers, and tactile sensors have been designed, built and tested. These sensors provide extremely high sensitivity, high bandwidth and wide dynamic range, and allowed miniaturization and integration. This paper has described the electron tunneling sensors performance and discussed their future development.

**Key words:** Tunnel, Accelerometer, Infrared detector, Magnetometer, Tactile sensor

龙志峰 男, 1974年10月生, 清华大学博士生。