

# 铁电晶体与器件

罗豪甦 焦 杰 李晓兵 赵祥永 许 晴 岳晴雯

(中国科学院上海硅酸盐研究所 200050)

## 1. 铁电单晶

与气体、液体以及玻璃态固体不同，晶体是一种具有三维周期性结构的固体，即具有平移对称性点阵结构的固体。晶胞作为晶体的基本结构是一个个彼此互相平行而等同的平行六面体基本单位，晶胞的结构特点决定了晶体的基本物理性能。晶体的分布非常广泛，自然界的固体物质中，绝大多数是晶体。

1655年，在法国西部大西洋沿岸一个盛产葡萄酒的港口城市——拉罗歇尔 (La Rochelle)，药剂师塞涅特 (Pierre de la Seignette) 在储藏葡萄酒的橡木桶里发现了一种晶体，即学名为酒石酸钾钠 (也被称为罗息盐) 的晶体是最早被人们发现的铁电晶体。这种铁电晶体在一定的温度范围内可以自发极化，而且其极化方向可以随外电场反向而翻转，晶体的这种性质被称为铁电性，具有铁电性的晶体被称为铁电晶体。以酒石酸钾钠为例，把构成晶体的每个原子当成一个点，在这些点排列构成的几何空间格架中正负离子中心不重合，会形成固有电偶极矩，即存在着自发极化 ( $\mathbf{P}$ )，使得整个晶体对外呈现极性。在外电场作用下，这种自发极化可以在几个能量相同的自发极化状态下变化，呈现多重势阱的特点。

为了降低电偶极矩相互作用的静电能，与铁磁物质的磁畴相似，铁电晶体通常由许多所谓的 (几微米至几十微米大小的) 电畴组合而成，而每个电畴具有自发极化和与它相伴随的自发应变。在电场作用下，铁电体电畴壁可以移动，且电极化方向能够随电场方向转向。由于形成了不同取向铁电畴，在没有施加外加电场进行电极化处理前，铁电晶体对外不显电极化；通常需要通过施加电场极化，使铁电晶体对外显示出电极化强度 (也称为束缚电荷)，表现出压电、热释电、各向异性的介电等极化前没有的宏观物理性能。

铁电晶体在一定的温度范围内才有自发极化强

度，当温度升高到居里温度  $T_c$  以上时，自发极化消失，晶体经历铁电 - 顺电相变，居里温度以上介电常数随温度变化满足居里 - 外斯定律，即在居里温度以上的顺电相中晶体介电常数  $\epsilon_r$  与绝对温度  $T$  有  $\epsilon_r \propto (T - T_c)^{-1}$  关系。铁电体电极化随电场而变化，极化与电场之间呈非线性关系，在电场作用下，新畴成核长大，畴壁移动，导致电极化转向，其极化强度可随外电场变化，从而表现出电滞回线的特点。

晶体外形具有反演对称操作 (i)、旋转对称操作 (2, 3, 4, 6)，旋转倒反对称操作 ( $\bar{2}$ ,  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$ ,  $\bar{6}$ )、对称面操作 (m)。表 1 总结了 32 个晶体宏观对称操作点群中，只有 10 个对称操作点群的晶体具有极性，可能存在自发极化成为铁电晶体。在铁电物理学三百多年来的发展中，共发现了上千种铁电体，其中有许多已经成为工业中广泛使用的材料。根据顺电 - 铁电相变的微观机制，可以将铁电体晶体进行分类。由顺电相到铁电相的相转变与离子的位移紧密相联系的为位移型铁电晶体，例如，钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅、铌酸钾、铌酸锂等；以及顺电相到铁电相的相转变是同晶体中氢离子有序化相联系的有序 - 无序铁电晶体，它主存在于含有氢键的铁电晶体，例如，磷酸二氢铵、硫酸三甘肽 (TGS) 等。

表 1 晶体极性与宏观对称性操作点群

	对称中心	无对称中心	
		极性	非极性
三斜	$\bar{1}$	1	
双轴晶体	单斜	2/m	2 m
	正交	mmm	mm2 222
	四方	4/m 4/mmm	4 4mm $\bar{4}$ $\bar{4}2m$ 422
单轴晶体	三方	$\bar{3}$ $\bar{3}m$	3 3m 32
	六方	6/m 6/mmm	6 6m $\bar{6}$ $\bar{6}m2$ 622
多轴晶体	立方	m3 m3m	432 $\bar{4}3m$ 23

人们对铁电体的种类、结构和性能已经有了非常深入的了解，例如除了铁电单晶之外，还有许多不同

种类的铁电陶瓷和铁电薄膜等不同的铁电体材料，有关铁电体基本理论目前已经形成了比较成熟的铁电物理学学科。

## 2. 弛豫铁电单晶

所谓弛豫铁电体，是由具有结构相同而构成元素种类不同的铁电体形成的固溶体，其结构上具有原子尺度的占位无序以及纳米尺度上存在极性微区的特点，表现出特殊的介电弛豫及相变特征。例如弛豫铁电体  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  (PMN) 是一类结构和性能都很特殊的铁电体，与正常铁电体相比有明显不同的特点，图 1 中横坐标是温度，纵坐标是介电常数和介电损耗，它显示出了 PMN 在不同频率下介电性能随温度变化的规律。从图中可以看到和正常铁电体  $\text{BaTiO}_3$  不同的是其介电峰比较宽，并且其峰值所对应的温度  $T_m$  随测试频率增加而升高，确实是体现了一种内部结构的转变，但是这种转变是不同于正常的铁电相变，在温度  $T_m$  以上，介电常数与温度的关系不符合居里-外斯定律而可表示为  $\epsilon_r^{-1} \propto (T - T_m)^\alpha$ ，其中  $1 < \alpha \leq 2$  ( $\alpha$  为弥散性指数)；而且即使冷却到非常低的温度 (如 5 K)，典型的弛豫铁电体中仍然无光学各向异性和 X 射线衍射峰的分裂迹象，即宏观上不出现向极性铁电相的转化，宏观上保持了假立方顺电相的结构；但是其在  $T_m$  以上相当高的温度，在弛豫铁电体中就可以观测到压电性和二次谐波等效应的发生，在温度低于转变温度  $T_m$  以下，外加电场可以从弛豫铁电体中诱导出宏观的铁电相，最典型的表现就是低温下具有电滞回线，随温度升高，电滞回线逐渐向非线性退化，但即使在温度稍高于  $T_m$  时仍可以观

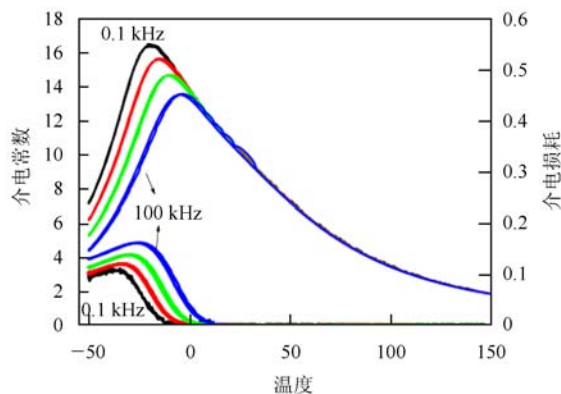


图 1 弛豫铁电体 PMN 的介电性能随温度的变化

察到电滞回线。

铁电晶体具有压电性能，可以用压电常数  $d = \partial D / \partial T$  来衡量压电性能，其中  $D$  为电位移， $T$  为应力，并用机电耦合系数  $k$  来衡量其机械能和电能之间转换的能力，压电常数和机电耦合系数越大说明铁电晶体的压电性能越高。目前正在广泛应用的  $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Nb}_x)\text{O}_3$  (略为 PZT) 铁电陶瓷，其压电常数  $d_{33}$  可以达到  $600 \times 10^{-12} \text{C/N}$  即单位应力作用下单位面积可产生  $600 \times 10^{-12} \text{C}$  电荷量，机电耦合系数  $k_{33}$  可以达到 70%，即在机械能-电能转换过程中有功输出机械能与输入电能的比值为 49% ( $k_{33}$  的平方)。

20 世纪 90 年代末发现的以  $x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - (1-x)\text{PbTiO}_3$  (略为 PMNT 或 PMN-PT) 为代表的弛豫铁电单晶具有超高的压电性能，PMNT 单晶的压电常数  $d_{33}$  和机电耦合系数  $k_{33}$  分别达到了 2000 pC/N 和 92% 以上，大大高于常用的 PZT 陶瓷；场致应变可以达到 1.7%，即对材料施加电场激励，材料的最大应变可达 1.7%，比 PZT 陶瓷材料 0.1% 高出了一个数量级。图 2 给出了铁电材料的压电性能  $d_{33}$  和机电耦合性能  $k_{33}$  的发展历程，正如 *Sciences* 所介绍，这是铁电领域 50 年来的“一次激动人心的突破”。

我国科技工作者于 1997 年在国际上率先采用改进的 Bridgman 方法，生长出了大尺寸高质量 PMNT 单晶，引起了国际同行的密切关注。目前所生长单晶的尺寸已达到  $\phi 75 \times 80 \text{ mm}$  (图 3)，可以满足新一代医用 B 超探头、声纳等高性能压电超声换能器等新一代功能器件的应用要求，国内外的许多研发结果都表

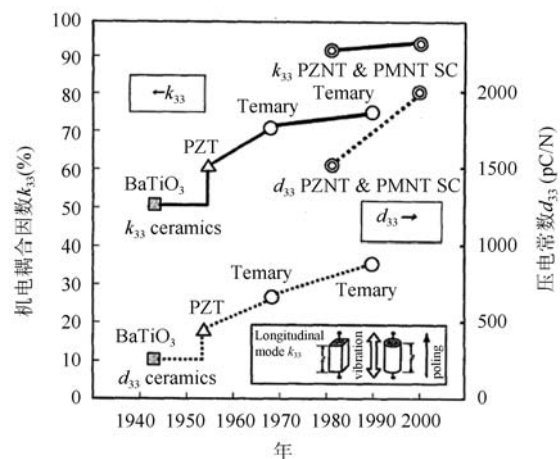


图 2 压电材料的发展历程



图3 上海硅酸盐所生长的  $\phi 75 \times 80$  mm PMNT 单晶

明，弛豫铁电单晶在高端压电器件中具有广泛的产业应用前景。

弛豫铁电体  $(1-x) \text{Pb}(\text{B}_1\text{B}_2)\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  ( $\text{B}_1=\text{Mg}, \text{Zn}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Sc}, \text{In}; \text{B}_2=\text{Nb}, \text{Ta}, \text{W}$ ) 是一种复合钙钛矿型结构的固溶体，随着  $\text{PbTiO}_3$  (简称 PT) 含量的增加，会发生成分诱导的三方-四方结构相变。与 PZT 系压电陶瓷相比，具有准同型相界 (Morphotropic phase boundary, 简称 MPB) 组成的  $(1-x) \text{Pb}(\text{B}_1\text{B}_2)\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$  弛豫铁电单晶，在准同型相界附近具有特别高的压电性能，因此弛豫铁电单晶在 MPB 组分附近的压电性能受到人们的密切关注。

PMNT 晶体除了具有优异的压电性能之外，还具有优异的热释电性能和电光性能。晶体受热或冷却后，由于温度变化 ( $\Delta T$ ) 而导致自发极化变化 ( $\Delta P_s$ )，从而在晶体某一定方向产生表面电荷的现象称为热释电效应，通常用热释电系数来衡量热释电性能的大小，即单位温升下自发极化的变化 ( $P=dP/dT$ )。而电光效应是指在材料上施加电场时，折射率性能发生变化的现象，电场一次项引起的折射率变化称为线性电光效应，电场的二次项引起折射率的变化称为二次电光效应，用电光系数来表征材料电光性能强弱。如 PMNT 单晶室温下热释电系数超过  $12.8 \times 10^{-4} \text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ，优于  $\text{LiTaO}_3$  和 TGS 等热释电材料。PMNT 单晶在三方相沿 [111] 有比较低的介电常数，在四方相沿 [001] 有比较低的介电常数，可以沿这些晶向选则热释电敏感元件制备红外探测器。此外，复合钙钛矿结构的 PMNT 单晶具有比较低的热扩散系数，有利于在高性能热释电探测器，以及在热成像系统中的实际应用。

弛豫铁电单晶具有非常高的线性 (Pocket 效应) 和二次电光 (Kerr 效应) 性能，如 PMN-0.33PT 单晶的电光系数可达  $182 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ，比常用的电光材料铌

酸锂单晶 ( $19.9 \times 10^{-12} \text{m/V}$ ) 高出一个数量级。立方相 PMN 和 PMN-0.08PT 单晶具有较大的二次电光系数，在 514.5 nm 波长下的二次电光系数 ( $R_{11}-R_{12}$ )，分别为  $0.91 \times 10^{-16} \text{m}^2/\text{V}^2$ ， $8.19 \times 10^{-16} \text{m}^2/\text{V}^2$ ，比 PLZT 陶瓷大得多，可广泛应用于电光调制器、高速光开关、可调谐滤波器和光偏转器等光电子器件中。

人们对弛豫铁电单晶的生长、性能和器件应用的研究都在不断深化，许多高性能新型铁电单晶还在不断涌现。例如，广泛引起人们关注的铌钽酸铅-铌镁酸铅-钛酸铅 ( $x\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-y\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-z\text{PbTiO}_3$  略为 PIMNT 或 PIN-PMN-PT) 晶体，不仅具有高居里点、较高的三方-四方相变温度 ( $T_{\text{TR}}$ )，同时还具有较大的矫顽场 ( $E_c$ )，可以扩大弛豫铁电单晶的使用温度和使用电场范围。

此外，近年来人们也非常关注无铅铁电/压电材料的发展，例如，围绕  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-x\text{BaTiO}_3$  单晶 (NBBT) (图4)、 $(\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{NbO}_3$  单晶 (KNN) (图5) 的研究，人们希望通过无铅压电单晶的研究，揭示高性能无铅铁电材料压电活性的结构特征，以及无铅铁电材料压电活性的机理，从而更加有效地指导无铅压电材料的可控制备，取代目前广泛使用的含铅铁电/压电材料，以实现人类生存环境的可持续发展。

### 3. 基于铁电单晶的功能器件

铁电材料具有优异的铁电、介电、压电、热释电、非线性光学等丰富的物理性能，在铁电存储器、高性能电容器、精密致动器、电声换能器等关键功能电子



图4 采用 TSSG 方法生长的  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-5\% \text{BaTiO}_3$  单晶 (NBBT95/5)





图5 采用 TSSG 方法生长的 KNN 单晶

器件中起着不可替代的重要作用。基于铁电材料的各种功能电子器件，广泛应用于信息、制造、环境、医疗、海洋、航空航天等国民经济和国防建设各个领域，相关材料及器件应用的全球市场规模已达到了 3000 亿美元/年。我国是铁电/压电材料生产、出口和使用的大国，预计 2014 年将超过欧洲，以 22% 的市场份额仅次于日本而位居世界第二，相关材料及器件应用的全球市场规模，每年已达到了 3000 亿美元，但我国还不是铁电/压电材料研制的强国，发展高性能铁电/压电材料和相关功能器件应用对我国国民经济发展和国防建设都具有重要的战略意义。

下面介绍利用弛豫铁电单晶，我们在研制超声换能器、磁传感器、红外探测器等方面的主要进展：

### 3.1 超声换能器

超声诊断技术与 X 射线成像技术 (XRD)、计算机断层扫描技术 (CT) 以及磁共振成像技术 (MRI) 并称为现代诊断技术的四种最重要的诊断技术，由于超声诊断具有安全、适应面广、直观、可重复检查、对软组织鉴别力强、便携灵活及价廉等优点，已经成为现代医学影像诊断中的首选，广泛应用于心脏科、妇产科、腹部扫描、脑中线检测、颅内血流检测、眼部扫描等。超声换能器 (Ultrasonic transducer) 是超声成像和超声检测系统的关键组成部分。压电材料是超声换能器的换能元件，对超声换能器的性能乃至整个超声成

像系统的性能至关重要。随着现代信息技术和医疗技术的不断向前发展，追求高压电系数、高机电耦合系数以及适中的介电常数和声阻抗特性是压电材料发展的重要方向。在强大应用需求的推动下，我们采用性能优异的弛豫铁电单晶 PMNT 和 PIMNT 研制了几种具有大带宽、高灵敏度的医用超声探头。

#### 3.1.1 2MHz 经颅多普勒探头

经颅多普勒 (Transcranial Doppler TCD) 是用超声多普勒效应来检测颅内脑底主要动脉的血流动力学及血流生理参数的一项无创性的脑血管疾病检查方法，主要以血流速度的高低来评定血流状况，由于大脑动脉在同等情况下脑血管的内径相对来说几乎固定不变，利用经颅多普勒探头进行检测时，由于大脑血管中血流的运动，使得检测信号形成多普勒效应，通过多普勒效应对检测血管中的血流流速进行推测，再根据脑血流速度的降低或增高就可以推测局部脑血流量的相应改变。并且通过大脑血管中血流流量可以在临床中得到血管收缩期血流速率、舒张期末血流速率、平均血流速率、脉动指数等血流生理参数。和常用的 PZT 陶瓷换能器相比较，我们制备出的基于弛豫铁电单晶 TCD 探头 (图 6) 的灵敏度增加了 4dB。

#### 3.1.2 单晶相控阵探头

相控阵超声换能器由多个压电单元按一定的规律分布排列，然后逐次按预先规定的延迟时间激发各个压电单元，所有单元发射的超声波形成一个整体波阵面，能有效地控制发射超声束 (波阵面) 的形状和方向，能够实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦，因此可以提供比单个或多个探头系统更多观察对象的实际大小、界面形状的信息。超声换能器在工作时，接收信

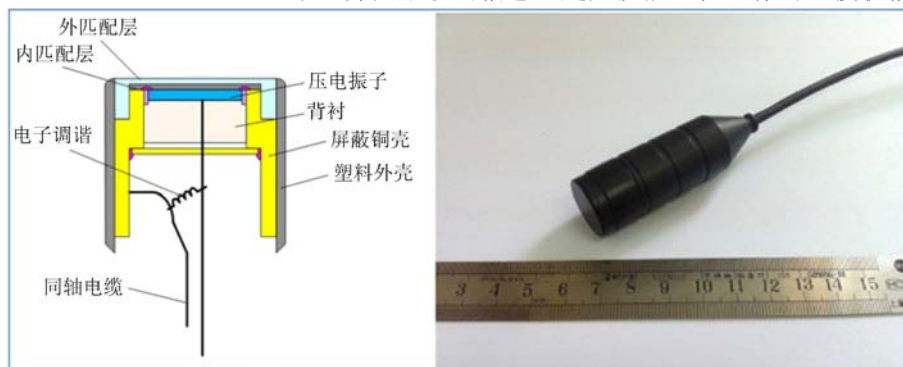


图6 经颅多普勒探头的结构和实物图

号是一个时域响应信号，通过傅里叶变换（FFT）就可以得到换能器接收的频域响应信号。在信号频域响应曲线中，最大响应信号下降 6dB 所对应两频率之差与换能器中心频率的百分比值，通常称为换能器的 @-6dB 带宽。在频域响应曲线中，最大频率响应信号下降 6dB 所对应的频率宽度与换能器中心频率的比值定义为换能器的 @-6dB 带宽。在医用超声换能器的性能表征中，换能器的 @-6dB 带宽越大，换能器工作时的频域响应宽度越大，相应的成像效果更好。

利用弛豫铁电单晶可以大幅提高相控阵探头的性能，我们制备出了基于弛豫铁电单晶 64 元相控阵探头（图 7）的带宽达到了 98.6% @-6dB，比 PZT 陶瓷探头带宽增加了 29%。

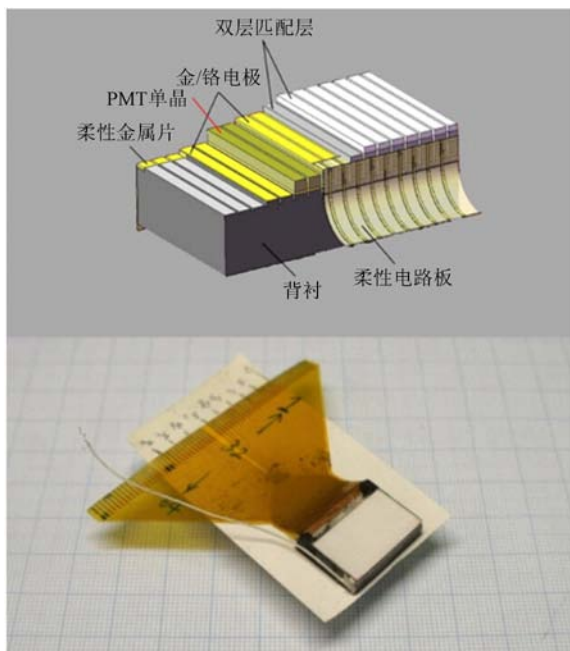


图 7 单晶相控阵换能器结构图和实物图

### 3.2 磁电复合材料与弱磁传感器

由压电材料和磁致伸缩材料构成的异质结复合材料，可以获得非常强的磁电耦合效应。材料的磁电效应是指电极化随外磁场变化，或磁矩随外电场变化的大小。异质结磁电复合材料的磁电效应是一种磁-弹-电耦合的间接磁电效应，磁致伸缩材料的压磁效应与压电材料的压电效应通过界面应变（弹性）耦合，间接实现磁场对电极化强度的控制，或电场对磁矩的控制。异质结磁电复合材料的磁电系数比单相磁电材料可高三个量级以上，基于异质结磁电材料，我们制备

出了一种基于新型磁探测原理的高性能交变弱磁传感器。这种新型磁传感器其磁探测极限 1Hz 频率下达到  $10^{-12}$  特斯拉量级，高频谐振状态可以达到  $10^{-15}$  特斯拉量级，其中磁探测极限代表了在特定信噪比要求下所能分辨的最小磁场强度。

基于异质结磁电材料的弱磁传感器的工作方式如下，通过对磁电材料施加直流磁场偏置，并制作特定的封装和电极，所制备的磁场敏感元器件输出与外磁场变化量成正比的电信号。磁场敏感元器件配合专用的电子电路，可构建一种全新概念的、与传统的磁场传感器相比具有更高弱磁场探测能力的磁场传感器，被称之为磁电型交变弱磁传感器，传感器的组成如图 8 所示。

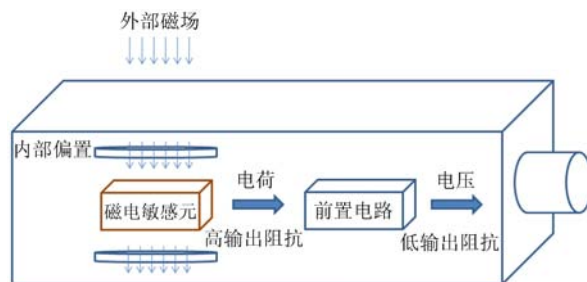


图 8 磁电型交变弱磁传感器的结构组成

表征磁电材料磁电效应强弱的参数是磁电系数，磁电系数定义为极化强度变化量与外磁场变化量的比值，即  $\alpha = \partial P / \partial H$ ，为了方便科学研究和工程应用，人们又定义了磁电电荷系数  $\alpha_Q = \partial Q / \partial H$  等参数。基于磁电材料的磁场敏感元准静态等效电路可近似为电荷源  $Q_H$  与电容  $C_E$ 、电阻  $R_E$  并联形式表示。

介电损耗反映了材料在交变电场作用下有功功率与无功功率的比值。磁电敏感元输出电学噪声由介电损耗  $\tan \delta$  等效的交流电阻的热噪声所主导，表述为噪声电流功率谱密度  $I_{n_j}^2 \approx 4kT\omega C_E \tan \delta$ ，其中  $k$  为玻尔兹曼常数， $T$  为温度， $\omega$  为角频率。因此，可以得到敏感元的噪声等效磁场：

$$NEB = \frac{\mu \sqrt{4kT\omega C_E \tan \delta}}{\omega \alpha_Q} \quad (1)$$

噪声等效磁场代表敏感元的弱磁场探测能力极限，从（1）式可以看出，敏感元的磁电电荷系数越高、电容和介电损耗越低，则噪声等效磁场越小，弱磁场探测能力越强。

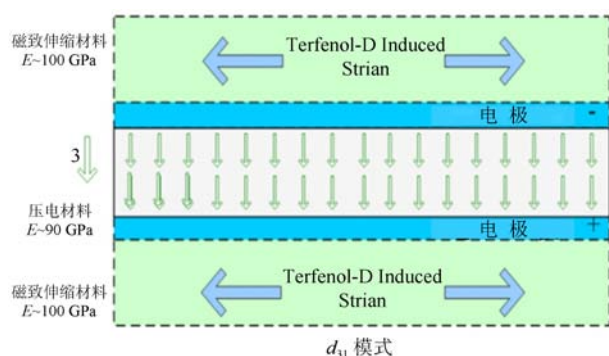


图9 异质结磁电材料简化的典型结构

目前基于磁致伸缩材料和压电材料层状复合的异质结磁电材料获得了较高的磁电系数，其简化的典型结构如图9所示。磁致伸缩材料通常选用 Terfenol-D 或 Metglas 合金。

新一代的 PMNT、PIMNT 弛豫铁电单晶压电材料与传统的 PZT 压电陶瓷相比具有明显的性能优势，压电常数达到 PZT 的 3~8 倍，介电损耗低一个数量级，能极大地提高所制备的磁电材料及磁场敏感元器件的弱磁场探测能力。我们制备的基于弛豫铁电单晶的高性能异质结磁电材料，如图 10 所示，其中 Metglas/PIMNT 多重推拉结构实现了  $\alpha_Q \sim 3346 \times 10^{-12} \text{C/Oe}$ 、 $C_E \sim 340 \times 10^{-12} \text{F}$ 、 $\tan \delta \sim 0.8\%$ ，噪声等效磁场可以达到  $3.2 \times 10^{-12} \text{T/Hz}^{1/2} @ 1 \text{Hz}$ ，其中 T 为磁感应强度的单位特斯拉。

此外，我们将弛豫铁电单晶磁电敏感元与专用前置放大器结合构成磁电型交变弱磁传感器，传感器分别在 1 Hz 和 3 Hz 的有效值  $20 \times 10^{-12}$  特斯拉交变弱磁场激励下，能实现 4 以上的信噪比。这种磁电型磁传感器具有高灵敏度、小型化、室温工作、低功耗、宽频带的突出综合性能优势，在国防安全、生物医学、

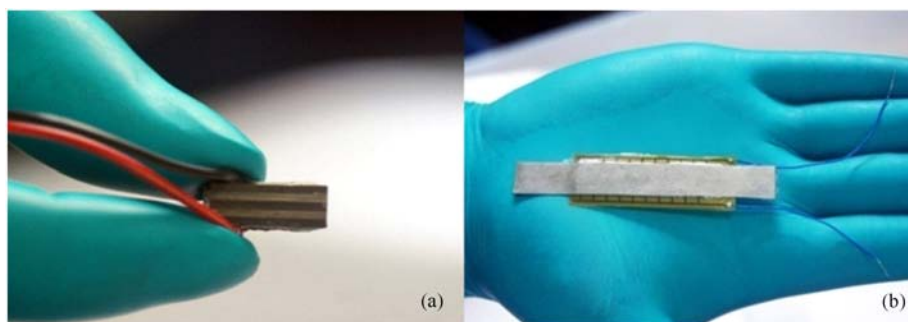


图10 基于弛豫铁电单晶的高性能异质结磁电材料 (a) Terfenol-D/PMNT L-T 多层并联结构 (b) Metglas/PIMNT 多重推拉结构

智能交通、先进制造等领域显示出了广泛的应用前景。

### 3.3 基于弛豫铁电单晶的热释电红外探测器

根据光辐射与物质相互作用的原理不同，红外探测器分为光敏型和热敏型探测器。基于光电效应的光量子探测器和基于热释电效应的热电探测器一直是红外探测的两大重要技术。与光量子探测器相比，热释电探测器具有宽的光谱响应，在室温下工作，无需制冷，结构紧凑，稳定可靠，价格低廉等诸多优点，从而在人体探测、智能家居、环境气体污染监测、红外成像、红外光谱仪等领域得到了广泛的应用。

热释电红外探测器的核心元件之一是灵敏元，当前用于制备热释电灵敏元的传统热释电材料，如水溶性晶体硫酸三甘肽 (TGS) 及其改性材料、氧化物晶体钽酸锂 ( $\text{LiTaO}_3$ )、铁电材料钛酸锶钡 (BST) 以及钽铈酸铅 (PST) 等，它们已在军事和商业中得到了广泛的应用。为进一步提高热释电红外探测器的探测能力，探索同时具有高热释电系数、低介电损耗和高温度稳定性的新型热释电材料一直是人们关注的热点。

弛豫铁电单晶铈镁酸铅-钛酸铅 (PMNT)，Mn 掺杂 PMNT，三元系铈铟酸铅-铈镁酸铅-钛酸铅 (PIMNT) 和 Mn 掺杂 PIMNT 不仅具有优异的压电性能，而且还具有非常优异的热释电性能。通过对弛豫铁电单晶的介电、热释电性能随固熔体组成、结晶学取向的研究，我们发现，[111] 取向的 PMN-0.26PT 和锰掺杂 PMN-0.26PT 单晶的热释电系数分别可以达到  $15.3 \times 10^{-4} \text{C/m}^2\text{K}$  和  $17.2 \times 10^{-4} \text{C/m}^2\text{K}$ ，是一种性能优异的热释电材料。并且掺杂后，二元和三元体系弛豫铁电单晶的介电损耗降至 0.0005，大大降低热

释电探测器的噪声水平。热释电材料的电噪声通常由其介电常数和介电损耗所主导，材料的红外辐射探测极限则由热释电响应和噪声共同决定。人们建立了由热释电系数、介电常数、介电损耗等本征参数所构成的热释电材料探测优值评价体系，用于热释电材料红外辐



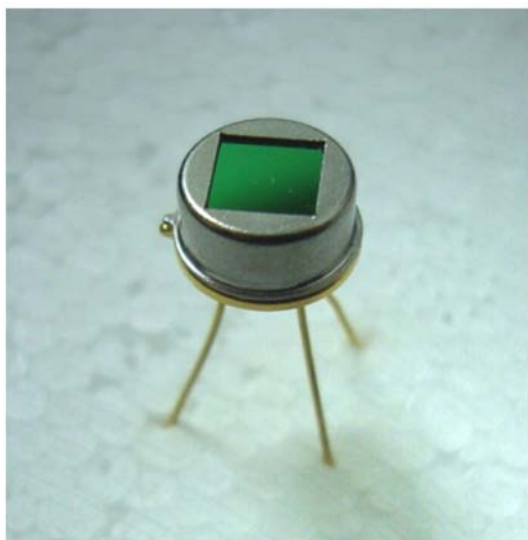


图 11 基于弛豫铁电单晶热释电单通道和双通道探测器射探测能力的评估。Mn 掺杂 PMN-0.26PT 单晶的探测优值从  $15.3 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1/2}$  提高至  $40.2 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1/2}$ , Mn 掺杂 PIMNT 的探测优值达到  $19.5 \times 10^{-5} \text{Pa}^{1/2}$ 。铁电单晶的居里温度 ( $T_c$ ) 决定着热释电红外探测器的使用温度和性能随温度变化的大小, 我们制备的 PIMNT (41/17/42) 和 Mn 掺杂 PIMNT (23/47/30) 单晶的  $T_c$  分别达到  $253^\circ\text{C}$  和  $179^\circ\text{C}$ , 具有比较宽的使用温度范围。

基于 Mn-0.28PMNT 弛豫铁电单晶, 将晶片减薄至  $20 \mu\text{m}$ , 采用红外吸收率更高的碳纳米管作为吸收层, 分别制备了电压模式和电流模式的单通道热

释电探测器和用于气体探测的双通道热释电探测器 (图 11)。电压响应率和比探测率为评价热释电探测器探测能力的重要指标, 电压响应率为单位辐射功率下电压响应大小, 比探测率为电压响应率乘以敏感元面积的平方根再除以噪声功率谱密度。我们制备的基于弛豫铁电单晶的热释电红外探测器, 其电流模式的电压响应率达到  $115 \text{ kV/W}$  ( $10 \text{ Hz}$ ), 比探测率在  $4 \text{ Hz}$  和  $10 \text{ Hz}$  时分别达到  $3.0 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  和  $2.21 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ , 性能比目前商用的高性能  $\text{LiTaO}_3$  探测器要高出 4 倍之多。

图 12 为我们和上海技术物理所合作研制的基于弛豫铁电单晶的  $128 \times 1$  线阵红外探测器, 弛豫铁电单晶在线阵探测器中表现出了优异的性能, 有望进一步在热成像领域得到更广泛的应用。

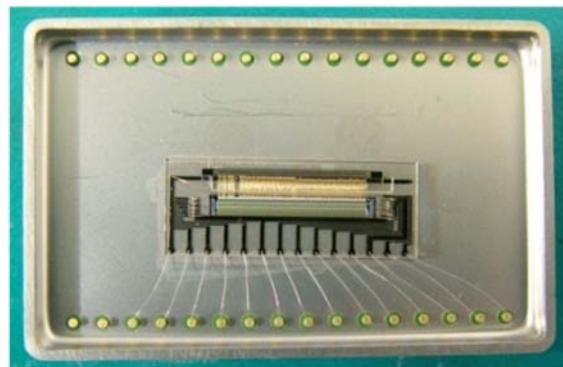


图 12 基于弛豫铁电单晶的  $128 \times 1$  线阵红外探测器



## 科苑快讯

### 地球引力使月球形状扭曲

从地球上看去, 月球似乎是完美球形。但是, 围绕月球运行的探测器发回的最新数据却表明, 从距离地球最近端到最远端, 它其实是略长的扁圆形。是什么原因造成了这种不太完美的形状?

月球形成两亿年后, 地壳薄弱, 下层岩石呈熔融状态, 使其容易受地球引力潮汐影响而扭曲。当月球冷却时, 形状就被固定, 形成“化石膨凸”, 确定了现在的地势。科学家已将文章发表在《自然》(Nature) 网站上。

研究者说, 月球后来又经历大规模的火山活动, 从 40 亿年前持续到 20 亿年前, 导致如今偏离中心的质量分布; 月球引力使这种不平衡进一步加剧, 最终

引起极轴的偏移。月球的北极目前保持稳定, 但是在导致质量不均衡分布的火山活动之前, 当时的北极点与现在相差  $36^\circ$ 。古极当时位于现在的北纬  $54^\circ$ , 即风暴洋 (Oceanus Procellarum) 的边缘。



(高凌云编译自 2014 年 7 月 27 日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))