

## 脉冲强磁场下的电极化测量系统

刘婉馨 陈瑞 刘永杰 王俊峰 韩小涛 杨明

### A pulsed high magnetic field facility for electric polarization measurements

Liu Wan-Xin Chen Rui Liu Yong-Jie Wang Jun-Feng Han Xiao-Tao Yang Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 057502 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191520

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191520>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于转角样品杆的脉冲强磁场电输运测量系统

Electrical transport measurement system in pulsed high magnetic field based on rotation sample rod

物理学报. 2019, 68(23): 230701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191115>

微纳尺度多铁异质结中电驱动磁反转

Electric field driven magnetic switching in nanoscale multiferroic heterostructures

物理学报. 2018, 67(15): 157512 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181219>

基于PbMg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>压电单晶的磁电复合薄膜材料研究进展

Progresses of magnetoelectric composite films based on PbMg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> single-crystal substrates

物理学报. 2018, 67(15): 157506 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180911>

铁电体的光伏效应

Photovoltaic effect in ferroelectrics

物理学报. 2018, 67(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180979>

BaTiO<sub>3</sub>/La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>-复合薄膜的磁致电极化和磁介电特性研究

Magneto-induced polarization enhancement and magneto-dielectric properties in oxygen deficient La<sub>0.67</sub>Sr<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>-/BaTiO<sub>3</sub> composite film

物理学报. 2018, 67(1): 017701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172019>

# 脉冲强磁场下的电极化测量系统\*

刘婉馨 陈瑞<sup>†</sup> 刘永杰 王俊峰 韩小涛 杨明

(华中科技大学物理学院, 国家脉冲强磁场科学中心, 武汉 430074)

(2019年10月8日收到; 2019年12月25日收到修改稿)

多铁性材料是当前物质科学研究的热点, 具有重要的科学研究意义和应用前景. 低温和强磁场实验环境为研究多铁性材料提供了一种有效途径. 脉冲强磁场下的电极化测量系统能实现最高磁场强度 60 T、最低温度 0.5 K 的铁电特性测量. 该系统采用热释电方法, 具有磁场强度高、控温范围广、转角测量等特点, 可用于强磁场下的磁电特性研究. 本文介绍了该系统的测量装置和实验原理, 并展示了其在多铁性材料研究中的一系列应用, 揭示了脉冲强磁场电极化测量系统在磁电特性探索中的重要作用.

**关键词:** 脉冲强磁场, 电极化, 多铁性材料, 磁电特性

**PACS:** 75.85.+t, 77.80.Fm, 01.52.+r

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191520

## 1 引言

探索和研究新型磁电耦合效应是当前材料和凝聚态物理领域的重要课题之一. 第 II 类多铁性材料也被称作磁致多铁材料, 其铁电性主要来源于内部特殊的自旋序, 一般具有很强的磁电耦合性能, 是实现磁电调控的优良载体, 受到了人们的关注<sup>[1,2]</sup>.

极低温、强磁场是研究物质磁结构、自旋相互作用及探究新奇物质态的重要条件. 多铁性材料在磁场作用下往往会发生一系列相变, 磁场强度越高, 观察到的相变信息就越丰富. 实验证明, 大量多铁性材料具有较低的居里温度和较强的相互作用, 常规的温度和稳态磁场测量极限下很难观察到更高磁场下的铁电态性质. 这大大限制了多铁性材料的研究与发展. 为了研究多铁性材料在更高磁场下的丰富相变行为和新奇物质态, 发展极低温、强磁场下的磁电性质测量系统具有重要的意义. 考虑

到国内磁电特性研究对于强磁场和极低温的需求, 我们搭建了一套基于脉冲强磁场的电极化测量系统. 该系统可实现磁场强度高达 60 T、温度低至 0.5 K 的电极化实验测量, 为多铁性材料的磁电特性研究提供了可靠的工具. 脉冲场电极化测量系统主要应用于具有较强磁电耦合效应的第 II 类多铁性材料, 其铁电性与磁性相互关联<sup>[3,4]</sup>. 在外磁场作用下, 材料的磁结构会发生显著变化, 从而对铁电性产生影响. 通过电极化特性测量结果, 结合磁化强度和介电常数等参量随磁场的变化情况, 可以推测物质内部的磁结构及其铁电形成机制. 利用这套脉冲强磁场电极化测量系统, 国家脉冲强磁场中心在多铁性材料研究领域已取得了一系列的科研成果<sup>[5-8]</sup>.

目前, 我们使用电极化测量系统来进行多铁性材料磁电特性研究, 揭示了强磁场诱导的多铁性, 磁场驱动的电极化翻转与反转以及磁电记忆效应等物理现象, 为多铁性材料的理论研究提供了实验基础. 本文主要针对脉冲强磁场电极化测量系统构

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11574098, 51821005) 和华中科技大学自主创新基金重点项目 (批准号: 2172018KFYXKJC005) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: ruicheng@hust.edu.cn

成、原理及其在多铁性材料研究中的相关应用开展了一系列介绍。

## 2 脉冲强磁场电极化测量

### 2.1 电极化测量系统组成

脉冲强磁场电极化测量系统由电源、磁体、低温和数据采集等部分组成. 图 1 为武汉国家脉冲强磁场电极化测量装置图. 脉冲电源是总能量为 1.25 MJ 的电容器模块, 脉冲磁体是 60 T 常规磁体. 利用脉冲电源对脉冲磁体进行快速放电, 极短脉冲时间内的电流变化会在磁体中心产生最高强度为 60 T 的脉冲磁场. 样品置于磁场中心, 并使用液氮浴低温系统冷却. 信号采集系统由高速采集卡 NI PXI-5105、信号放大器 SR560、信号调制单元等构成. 在测量过程中, 使用局域网控制中心施加脉冲触发信号. 通过光纤和光电转换, 触发信号转换为电信号传输到计算机中, 最终实现参数设置以及数据的监控和采集.

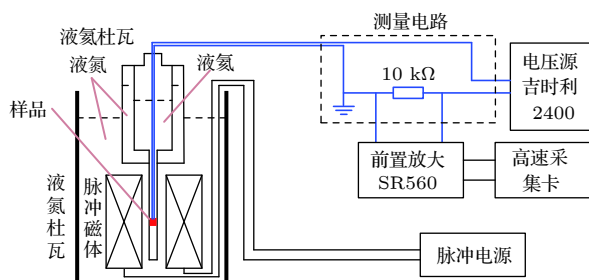


图 1 脉冲强磁场电极化测量系统

Fig. 1. Schematic drawing for pulsed-high-magnetic-field polarization measurement system.

### 2.2 脉冲强磁场

脉冲磁体由铜银或铜钨合金导线绕制而成, 可看作空心螺线管. 实验中使用的脉冲电源具有 48 个模块, 当脉冲电源对脉冲磁体快速放电时, 能瞬间给脉冲磁体输入相当大的电流, 磁体内部螺线管便会产生脉宽短、强度高的脉冲磁场. 图 2 展示了脉冲磁体的磁场波形. 使用不同数量的电源模块和放电电压, 可以实现磁场强度为 0—60 T, 脉宽为 4.3—10.8 ms 范围内连续可调的脉冲磁场. 脉冲场测量的电磁干扰较强、振动噪音较大, 具有一定的背底信号. 为了消除实验误差, 在测量过程中将顺电相的测量结果作为背底扣除, 最终得到样品的信号. 此外, 在进行高压放电时脉冲磁体会产生

大量热量, 为了使其快速降温需将磁体一直浸泡在液氮中, 且待其冷却到一定温度方可进行再次放电.

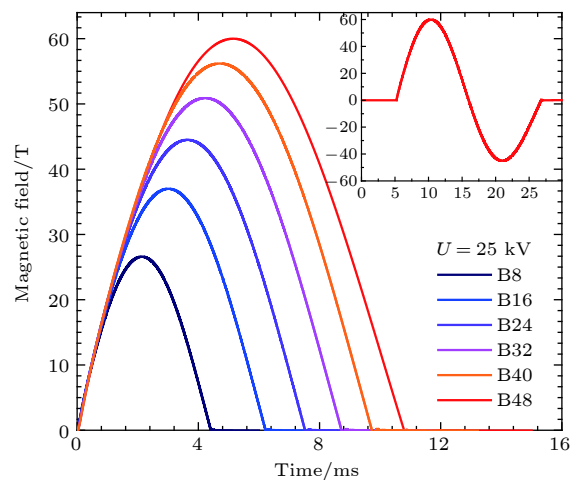


图 2 磁体在不同电源模块下的磁场波形图 (插图是通过改变放电电路产生的正负连续脉冲磁场)

Fig. 2. Pulsed magnetic fields generated by different capacitor banks (Inset: A full pulse including both positive and negative pulsed magnetic fields).

### 2.3 低温系统

低温系统由液氮杜瓦、液氮杜瓦、样品插件、真空减压泵和控温仪等组成, 具有良好的热和结构稳定性. 通过液氮使脉冲磁体和液氮浴低温系统外壁降温至 77 K, 向液氮杜瓦输入液氮可进一步将温度降至 4.2 K. 样品插件置于液氮杜瓦中, 利用氦四减压降温方式可在插件内部达到最低 1.4 K 的低温环境. 通过缠绕在样品杆前端的加热丝, 该氦四低温系统可以实现 1.4—300.0 K 的连续变温测量. 根据实验需求, 我们还配备了氦三插件, 能够实现最低温度 0.5 K 的实验测量. 相对于氦四系统, 氦三系统操作复杂、降温时间长. 实验中, 需要先将其置于氦四液体环境降至 1.4 K, 通过对氦三气体进行循环冷凝、减压等操作, 可以达到最低温 0.5 K.

### 2.4 测量系统

图 3(a) 展示了电极化测量电路. 样品、电压源 ( $V_p$ ) 和参考电阻 ( $R_s$ ) 串联接入电路, 其中  $V_p$  是 Keithley 2400 电压源,  $R_s$  是阻值为 10 k $\Omega$  的定值电阻. 样品上下表面涂上银胶, 通过金线引出作为电极, 接入样品杆并置于磁体中心. 在磁场作用下, 样品内部发生铁电极化并产生极化电荷, 电荷定向移动形成电流. 使用高速采集卡采集参考电阻两端

的电压即可得到极化电流信号 ( $dP/dt$ ) 随时间的快速响应. 积分相应的信号最终获得电极化强度 ( $P$ ).

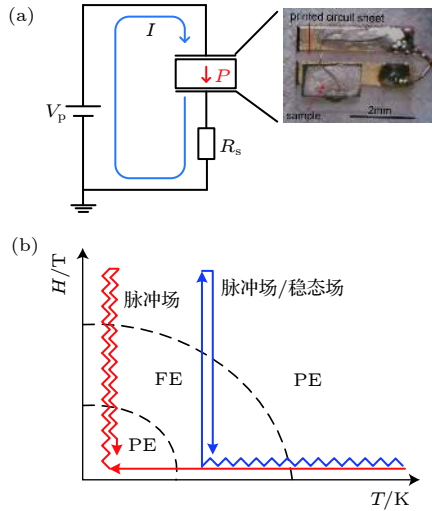


图 3 (a) 电极化测量电路图; (b) 稳态和脉冲场下的电极化测量过程 (折线部分表示该过程施加了电压)  
 Fig. 3. (a) Circuit diagram of electric polarization measurement; (b) measurement paths in steady and pulsed magnetic fields (The sawtooth lines denote the measuring process with applying voltage).

样品杆是测量系统的关键部分, 其质量能直接决定测量信号的有效性与准确性. 图 4 为电极化测量系统的样品杆结构图, 由感应线圈、补偿线圈、温度计和样品台等结构组成, 分别有垂直杆和旋转杆两种装置. 垂直杆可进行物质某一特定方向的特性测量, 测量时不可改变角度. 旋转杆利用杠杆原理<sup>[9]</sup>, 通过调节角度旋钮, 杆内的传动杆发生转动进而带动齿轮, 在齿轮的牵引下样品台发生转动, 能连续改变样品与磁场之间的角度, 实现高精度的角度控制, 转角范围为  $-5^{\circ}$ — $185^{\circ}$ .

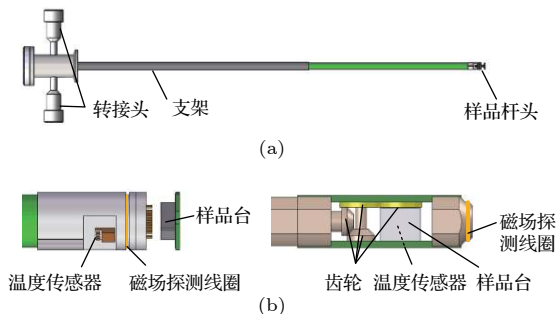


图 4 (a) 电极化测量样品杆示意图; (b) 样品杆底端构造 (左边为垂直杆, 右边为旋转杆)  
 Fig. 4. (a) The sample probe for electric polarization measurement; (b) the bottom of the probe (Left: a standard design; right: a rotation probe).

### 2.5 热释电流测量

稳态场在电极化测量过程中具有振动噪音小、磁场稳定和连续可调控等优势, 但扫场速率低、磁场范围小, 常规的商业测量系统一般只能实现磁场强度到达 16 T 的物性测量, 目前国际稳态磁场测量最高可达 45 T. 脉冲磁场扫场速率快、磁场强度高, 最高可达 60 T. 脉冲场电极化测量采用热释法, 由于扫场速率非常快 ( $dH/dt \sim kT/s$ ), 这种测量技术对磁相变导致的铁电化改变异常灵敏, 是研究磁致多铁材料的一种强有力实验手段. 脉冲场的测量时间为毫秒量级, 远小于样品热交换时间; 样品台采用绝缘材料, 可以避免涡流效应对实验环境带来的影响, 所以测量过程中样品温度基本不变. 图 3(b) 描述了稳态场及脉冲场下的电极化测量过程. 稳态场的电极化测量需要在样品降温过程中施加极化电压 (poling voltage), 待样品降至测量温度后撤去电压进行测量, 而脉冲场电极化测量可以在测试时施加偏置电压. 当测量温度处于样品的自发极化态时, 为使铁电畴完全极化, 需要在降温过程施加电压. 实际测量时需撤去电压, 施加脉冲强磁场并采集电极化信号随磁场的变化; 当测量温度处于样品的顺电态时, 为增大测量信号, 在测量过程中需要施加偏置电压将顺电态的多畴尽可能地转变为单畴. 我们的脉冲场电极化测量系统, 可以实现偏置电压下的电极化测量 (如图 3(b) 红色路径所示), 在电极化信号弱且基态为顺电态的样品测量中颇有优势.

下面以  $Co_4Nb_2O_9$  单晶的电极化实验为例, 介绍脉冲强磁场电极化测量原理和实验过程.  $Co_4Nb_2O_9$  是近年来被发现的一种新的单相多铁材料, 在低磁场下具有大的线性电磁耦合效应. 实验时, 先把样品从室温降温至 1.6 K, 然后在 1 kV/mm 的电场条件下施加脉冲强磁场, 采集电压信号  $U$ , 通过处理得到电极化信号  $P$ , 即

$$P = \frac{Q}{S} = \int \frac{U/R_s}{S} dt,$$

其中  $R_s$  为定值电阻的阻值,  $Q$  为样品极化电荷,  $S$  为样品上下表面面积. 以  $H(t)$  为横坐标,  $P(t)$  为纵坐标做图, 可以得到  $Co_4Nb_2O_9$  的  $P(H)$  电极化曲线, 如图 5(b) 所示. 强磁场下的电极化测量结果表明,  $Co_4Nb_2O_9$  在 40 T 时发生铁电到顺电相变, 42 T 以上铁电态被磁场完全压制. 此外, 研究发

现 40 T 以下的升降磁场数据表现为不可逆性. 降场数据表现为线性磁电响应, 而对于升场数据只有当磁场高于 30 T 时才产生磁场诱导的电极化, 表明  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  中存在强的铁电畴壁钉扎效应. 通过变温电极化测量, 可以进一步得到  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  在强磁场下的  $H$ - $T$  磁电相图.

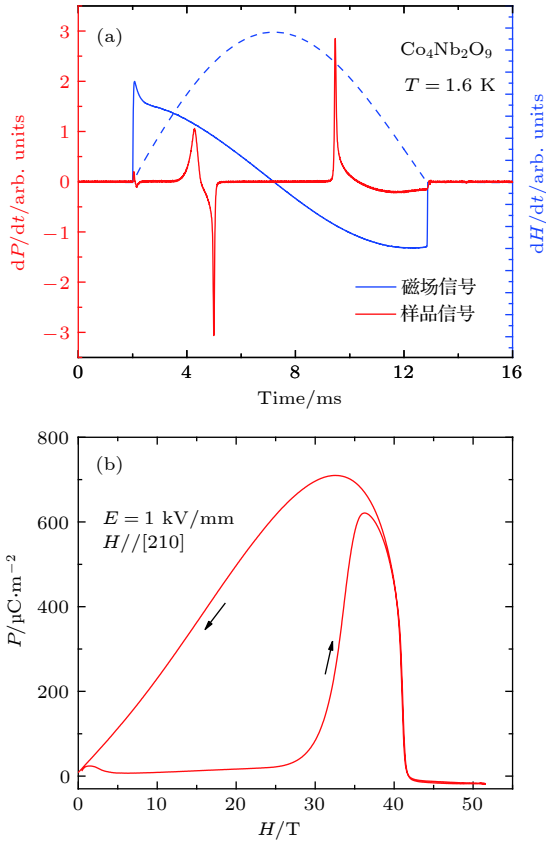


图 5 多铁材料  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$  的电极化测量结果 (a) 原始实验数据; (b) 数据处理结果  
Fig. 5. Electric polarization measurement of multiferroic  $\text{Co}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ ; (a) Raw data; (b) the resulting  $P(H)$  curve.

### 3 该系统在多铁性材料研究中的应用

#### 3.1 磁场诱导的铁电极化

多铁性材料内部存在晶格、电荷、轨道和自旋等自由度的相互作用, 蕴含着丰富的物理性质. 大量实验和理论表明特殊的自旋序可以诱导铁电极化<sup>[10,11]</sup>. 磁场能与自旋直接作用, 不但可以诱导特殊自旋序的产生而出现铁电极化, 还可以通过改变自旋序的排列对铁电极化进行调制. 因此, 强磁场电极化测量是探测和研究磁场诱导铁电性的重要手段. 近期, 通过对螺旋链  $R_2\text{V}_2\text{O}_7$  ( $R = \text{Ni}, \text{Co}$ ) 的强磁场磁化和电极化测量, 我们发现两种化合物

的多晶材料分别在 8—30 T 和 7—12 T 之间呈现了 1/2 量子磁化平台特征, 在低于和高于磁化平台的磁场区间表现为多铁性, 高场铁电相的电极化值达到 50—60  $\mu\text{C}/\text{m}^2$ <sup>[11,12]</sup>. 图 6 显示了  $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$  多晶的强磁场电极化曲线. 这些实验结果不仅证明了  $R_2\text{V}_2\text{O}_7$  ( $R = \text{Ni}, \text{Co}$ ) 是一类同时具有磁化平台和多铁性的新型第 II 类多铁性材料, 还预示了玻色-爱因斯坦凝聚与铁电性之间的潜在关联.

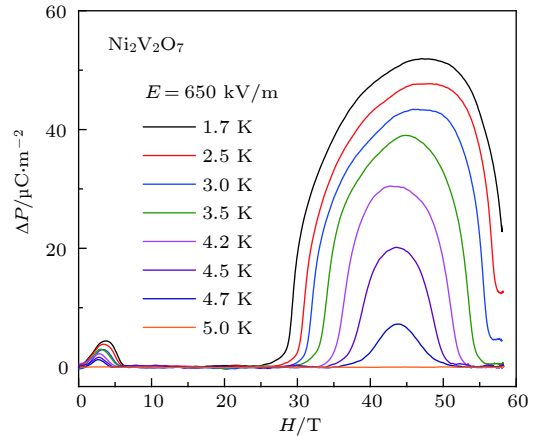


图 6  $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$  多晶在强磁场下的电极化特性曲线 ( $\Delta P = P(H) - P(H = 0)$ )<sup>[11]</sup>  
Fig. 6. Polarization curves of polycrystalline  $\text{Ni}_2\text{V}_2\text{O}_7$  in high magnetic fields ( $\Delta P = P(H) - P(H = 0)$ )<sup>[11]</sup>.

#### 3.2 铁电极化的磁电调控

多铁性材料在温度、磁场、压力及电压等外部条件作用下会出现一系列新奇的物理现象, 如热释电效应、压电效应和极化翻转等<sup>[13,14]</sup>. 因此, 通过外磁场及偏置电压来控制铁电畴的方向, 可以调控铁电性. 脉冲强磁场电极化测量装置可以在测试中引入电场参量, 实现不同偏置电压下的电极化测量, 为多铁性材料的磁电调控提供了新思路.  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  是一种典型的 kagomé 梯形自旋阻挫材料, 具有丰富的磁电性能<sup>[15,16]</sup>. 图 7 是  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  在不同外加电压下的  $P(H)$  曲线, 在 2—11 T 和 19—24 T 展示了两个磁场诱导的铁电相. 当外加不同方向的偏置电压时, 2—11 T 的铁电相呈现了反常的磁电记忆效应, 存在一个特征的磁场临界点: 当磁场小于 11 T 时, 具有记忆效应的电极化完全冻结, 不随偏压而改变; 而当外加磁场大于该转变磁场时, 电极化在反向偏压下出现两步极化反转. 这是在强磁场下首次观察到的新奇磁电记忆效应. 根据实验结果, 我们提出了一种“成核-钉扎-去钉扎”联合机制, 合理地解释了这种记忆效应的起源.

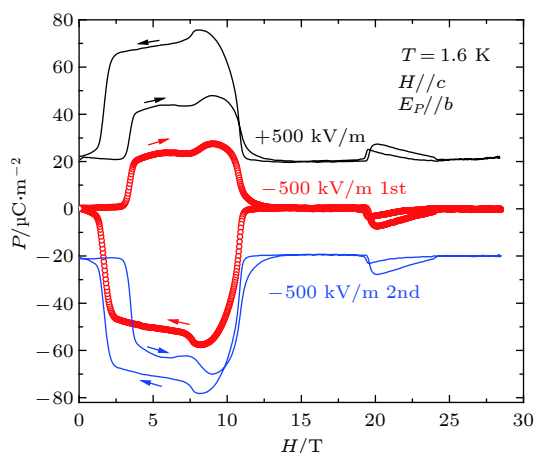


图7  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  在不同偏置电压下的电极化反转及磁电记忆效应研究 (首先, 施加+500 kV/m 的电场, 测量 1.6 K 下的电极化强度; 接着, 施加-500 kV/m 的电场, 进行两次连续的脉冲磁场电极化测量)

Fig. 7. Study on polarization reversal and magnetoelectric memory effect of  $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$  in different voltages (First, an electric field of +500 kV/m is applied to measure the electric polarization at 1.6 K. Then, two successive pulsed fields are performed by applying an electric field of -500 kV/m).

### 3.3 脉冲强磁场下的转角测量

脉冲强磁场下开展的转角电极化测量系统, 可测量样品电极化的角度依赖性, 从而更全面地探索多铁性材料的磁电特性 [14,17,18]. 日本脉冲强磁场中心利用转角电极化测量系统, 对第一类多铁性材料  $\text{BiFeO}_3$  开展了强磁场下的电极化特性研究 [19]. 研究发现, 当磁场与  $x$  晶轴夹角增大到  $60^\circ$  时,  $\text{BiFeO}_3$  电极化发生反转, 这证实了  $\text{BiFeO}_3$  在磁

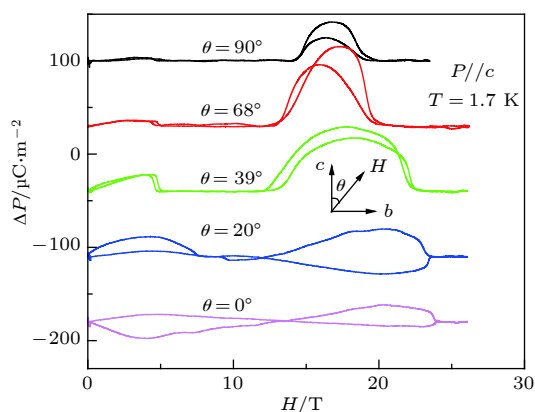


图8  $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$  在强磁场下的转角电极化测量 (磁场在  $bc$  面内旋转, 与  $c$  轴方向的夹角用  $\theta$  代表)

Fig. 8. Angle-dependent polarization measurements of  $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$  in high magnetic fields (the magnetic field is rotated in the  $bc$  plane, and the angle between the magnetic field and the  $c$ -axis direction is represented by  $\theta$ ).

场作用下磁畴发生重新定向, 电极化与磁畴相互耦合从而发生反转 [20]. 图 8 是利用武汉脉冲强磁场电极化转角系统测得的实验现象, 表现了外磁场与样品晶轴方向的夹角发生变化时  $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$  的电极化特性 [21]. 当磁场方向由  $b$  轴向  $c$  轴旋转时, 高场铁电相的相边界逐渐扩大直至和低场铁电相发生交叠; 与此同时, 电极化强度先增大后减小, 在两相交汇后, 其电极化方向发生了  $180^\circ$  反转, 揭示了强磁场诱导下电极化连续转换的磁开关效应.

## 4 结论

磁电耦合效应的发现使得多铁性材料具有巨大的应用前景. 脉冲强磁场下的电极化测量系统是研究强磁场磁电效应的重要工具. 利用武汉国家脉冲强磁场电极化测量系统, 我们观测到了多铁性材料中磁场诱导的多铁态、电极化反转和磁电记忆等新奇物理效应, 为多铁性材料在磁电器件、信息存储及电子自旋调控等方面的应用提供了实验依据. 本文通过阐述和介绍强磁场电极化测量系统在多铁研究领域的相关研究进展, 体现了脉冲强磁场对物质磁电特性研究的作用. 同时表明, 脉冲强磁场下的电极化测量系统已经成为多铁性材料研究的重要科研手段. 未来, 我们将对该系统进行不断优化与完善, 为国内外研究工作者提供一个功能强大的极端条件实验平台.

## 参考文献

- [1] Schmid H 1994 *Ferroelectrics* **162** 317
- [2] Scott J F 2007 *Nat. Mater.* **6** 256
- [3] Fiebig M J 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 123
- [4] Schmid H 2008 *J. Phys. Condens. Matter* **20** 434201
- [5] Ouyang Z W, Sun Y C, Wang J F, Yue X Y, Chen R, Wang Z X, He Z Z, Xia Z C, Liu Y, Rao G H 2018 *Phys. Rev. B* **97** 144406
- [6] Liu Y J, Wang J F, Sun X F, Zhou J S, Xia Z C, Ouyang Z W, Yang M, Liu C B, Chen R, Cheng J G, Kohama Y, Tokunaga M, Kindo K 2018 *Phys. Rev. B* **97** 214419
- [7] Yin L, Ouyang Z W, Wang J F, Yue X Y, Chen R, He Z Z, Wang Z X, Xia Z C, Liu Y 2019 *Phys. Rev. B* **99** 134434
- [8] Zhang X X, Xia Z C, Ke Y J, Zhang X Q, Cheng Z H, Ouyang Z W, Wang J F, Huang S, Yang F, Song Y J, Xiao G L, Deng H, Jiang D Q 2019 *Phys. Rev. B* **100** 054418
- [9] Liu Q Y, Wang J F, Zuo H K, Yang M, Han X T 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 230701 (in Chinese) [刘沁莹, 王俊峰, 左华坤, 杨明, 韩小涛 2019 物理学报 **68** 230701]
- [10] Liu Y J, Wang J F, He Z Z, Lu C L, Xia Z C, Ouyang Z W, Liu, R. Chen C B, Matsuo A, Kohama Y, Kindo K, Tokunaga M 2018 *Phys. Rev. B* **97** 174429

- [11] Chen R, Wang J F, Ouyang Z W, He Z Z, Wang S M, Lin L, Liu J M, Lu C L, Liu Y, Dong C, Liu C B, Xia Z C, Matsuo A, Kohama Y, Kindo K 2018 *Phys. Rev. B* **98** 184404
- [12] He Z Z, Yamaura J I, Ueda Y, Cheng W D 2009 *Phys. Rev. B* **79** 092404
- [13] Matsubara M, Manz S, Mochizuki M, Kubacka T, Iyama A, Aliouane N 2015 *Science* **348** 1112
- [14] Abe N, Taniguchi K, Ohtani S, Takenobu T, Iwasa Y, Arima T 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 227206
- [15] Cabrera I, Kenzelmann M, Lawes G, Chen Y, Chen W C, Erwin R, Gentile T R, Leão J B, Lynn J W, Rogado N, Cava R J, Broholm C 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 087201
- [16] Rogado N, Lawes G, Huse D A, Ramirez A P, Cava R J 2002 *Solid State Commun.* **124** 229
- [17] Fina I, Fàbrega L, Martí X, Sánchez F, Fontcuberta J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 257601
- [18] Akaki M, Iwamoto H, Kihara T, Tokunaga M, Kuwahara H 2012 *Phys. Rev. B* **86** 060413
- [19] Catalan G, Scott J F 2009 *Adv. Mater.* **21** 2463
- [20] Tokunaga M, Akaki M, Ito T, Miyahara S, Miyake A, Kuwahara H, Furukawa N 2015 *Nat. Commun.* **6** 5878
- [21] Chen R, Wang J F, Ouyang Z W, Tokunaga M, Luo A Y, Lin L, Liu J M, Xiao Y, Miyake A, Kohama Y, Lu C L, Yang M, Xia Z C, Kindo K, Li L 2019 *Phys. Rev. B* **100** 140403

# A pulsed high magnetic field facility for electric polarization measurements\*

Liu Wan-Xin    Chen Rui<sup>†</sup>    Liu Yong-Jie    Wang Jun-Feng  
Han Xiao-Tao    Yang Ming

(*Wuhan National High Magnetic Field Center, School of Physics, Huazhong  
University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 8 October 2019; revised manuscript received 25 December 2019)

## Abstract

Multiferroic materials, which exhibit the coexistence of ferromagnetic, ferroelectric, or ferroelastic orders, are of particular interest for not only fundamental physics but also potential applications. An important physical property of multiferroic materials, especially those with magnetically driven ferroelectricity, is known as a strong magnetoelectric coupling between the magnetic order and the ferroelectric order. The external magnetic fields can directly interact with spins or magnetic moments of the materials and lead the spontaneous ferroelectricity to be suppressed, and in some cases result in field-induced ferroelectricity in a higher field. Depending on the exchange interactions, these ferroelectric phase transitions may take place in a critical magnetic field as high as several tens of tesla. The standard electric-polarization measurement based on a commercial PPMS system is limited by the strength of the static field consequently. As an extremely experimental condition, pulsed magnetic fields can be used to reveal new physical phenomena in multiferroic materials. Due to the short pulse duration and the effect of eddy current, this measurement technique under pulsed high magnetic fields is still a challenge to date although a few laboratories have developed it in recent years.

Wuhan National High Magnetic Field Center (WHMFC) of China is a newly built pulsed-field laboratory. This experimental station is equipped with the many measuring instruments such as for measuring electric transport, magnetization, electron spin resonance, magneto-optics, and high pressure, which were established after the national assessment at the end of 2014. Recently, using a pyroelectric technique we successfully constructed an electric-polarization measurement system based on the large-scaled facility at the WHMFC. The nondestructive magnet driven by discharging a 1.25 MJ capacitor bank can generate a pulsed field up to 60 T. By tuning the charging energy and voltages, the pulse duration time can be modulated from 4.3 ms to 10.8 ms. A helium-3 cryogenic system equipped on this facility can achieve a lowest temperature down to 0.5 K. A high-precision rotation probe is designed and fabricated with angle varying from  $-5^\circ$  to  $185^\circ$  for an angular-dependent study. The pyroelectric current is detected by a shunt resistor of 10 k $\Omega$  and the electric polarization is derived by integrating the pyroelectric current over the time. The resulting data have a good accuracy and quality which are helpful in detecting weak ferroelectric phase transitions induced by pulsed fields with a fast field sweep rate. In this paper, we introduce this measurement system in detail including the method, principle and its advantages in comparison with those in static fields. Recent study and progress of magnetoelectric multiferroic materials under high magnetic fields are also reported.

**Keywords:** high magnetic fields, electric polarization, multiferroics, magnetoelectric properties

**PACS:** 75.85.+t, 77.80.Fm, 01.52.+r

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191520

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574098, 51821005) and the Independent Innovation Fund Project of Huazhong University of Science and Technology, China (Grant No. 2172018KFYXKJC005).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: ruicheng@hust.edu.cn