

$\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 中掺杂浓度对电脉冲诱导电阻转变效应的影响*

陈顺生¹⁾²⁾ 杨昌平^{2)†} 肖海波²⁾ 徐玲芳²⁾ 马广¹⁾

1) (湖北理工学院数理学院, 黄石 435003)

2) (湖北大学物理学与电子技术学院, 武汉 430062)

(2011 年 12 月 14 日收到; 2011 年 12 月 28 日收到修改稿)

采用两线测量模式对固相烧结方法制备的 $\text{Nd}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($\text{A} = \text{Ba}, \text{Ca}, \text{Sr}, x = 0-0.9$) 陶瓷样品电脉冲诱导电阻转变 (EPIR) 效应和 I - V 特性进行了测量. 结果表明, 与 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 一样, 相同浓度掺杂的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 样品也能诱发稳定的室温 EPIR 效应. 进一步对 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 系列样品的 EPIR 研究表明, 这种界面相关的 EPIR 效应与样品中电子或空穴掺杂浓度密切相关, 在半掺杂 ($x = 0.5$) 附近, 样品与电极接触界面能诱发稳定的 EPIR 效应. 然而, 随掺杂浓度的进一步增大或降低, EPIR 效应逐渐出现减弱、不明显到完全消失的过程. 产生这种现象的原因可能与锰氧化物中由于掺杂浓度差异所导致的界面缺陷在不同极性脉冲激励下重新分布而产生的内电场强弱有关.

关键词: 电脉冲诱导电阻转变效应, 深能级陷阱, 锰氧化物, I - V 非线性

PACS: 73.40.-c, 73.20.-r

1 引言

自 20 世纪 50 年代初以来, 钙钛矿结构锰氧化物成为凝聚态物理学的研究焦点. 前期的研究工作主要集中在内禀奇异电子态及其机制的探讨上, 包括电荷-轨道有序、内禀纳米尺度电子相分离、双交换作用、Hubbard 位内电子库仑排斥作用和 Jahn-Teller 作用等重要相互作用和理论都已提出^[1-4]. 后期研究则主要集中在磁阻 (MR) 效应^[5-8]、电致电阻 (ER) 效应^[9-11] 等与材料显微结构有关的外禀属性上. 近来, 一种基于 ER 效应的电脉冲诱导电阻转变 (EPIR) 效应引起了人们的兴趣^[12-18]. EPIR 效应是指材料的电阻随脉冲极性变化而在高低阻态间进行切换的行为. 与 MR 效应相比, 这种奇特的输运行为不需要较大的外场, 并且可在室温发生, 具有高低阻态转换速度快 (ns 量

级)、可逆、非易失性和良好的抗疲劳特性, 与半导体 CMOS 工艺兼容, 结构简单, 集成度高等特点, 能很好地满足新一代高密度、高速度和低能耗存储器的要求, 有望实现电阻式存储器 (RRAM) 的工业应用. 然而, 稀土锰氧化物 EPIR 效应的物理机制和起源仍未取得统一认识, 多种模型已被建立并用来解释实验中所观察到的现象, 如场诱导晶体缺陷模型^[13]、电荷捕捉模型^[14]、畴及隧穿模型^[15]、丝线通道模型^[16]、肖特基势垒模型^[17]、氧化还原模型^[18]. 然而每种模型只能解释部分的实验现象, 并不能对整个 EPIR 效应给出合理解释. 对于 EPIR 效应的起源问题更是存在很大分歧, 甚至相互矛盾, 如 Liu 等^[12] 认为 EPIR 效应来源于半导体的体性质, 并认为外界施加的脉冲电场可以使体系中铁磁团簇的形状发生改变和移动, 由随机分布转向有序排列, 导致电子电导增大, 电阻减小; 当施加反向脉冲后, 铁磁团簇再次发生改变和移动, 从而导致电

* 国家自然科学基金 (批准号: 11074067, 11174073) 和教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-08-0674) 资助的课题.

† E-mail: cpyang@hubu.edu.cn

阻增大. 而 Baikarov 等^[19]则认为, 体效应模型与极化子模型很难协调, 他们通过对 Ag/PCMO/YBCO 三明治结构进行研究后, 认为这种转变效应发生在 Ag/PCMO 的界面处, 并且银和氧之间发生的电化学反应是 EPIR 效应的根本原因. Sawa 等^[17]通过对 Ti/PCMO 研究后认为 EPIR 效应也是发生在 Ti/PCMO 界面处, 界面的陷阱对载流子的捕捉和释放是诱发 EPIR 的关键, 并据此提出了界面类肖特基势垒模型. Shang 等^[20]通过对 Ag/LCMO/Pt 三明治结构的研究, 解释了 Ag/LCMO 界面 I - V 非线性、回滞和不对称性的原因, 并从理论角度探讨了 EPIR 的疲劳特性, 提出 EPIR 的产生应归因于类块体限制性输运诱导的界面效应. Aoyama 等^[21]通过对 PCMO 薄膜的光反射系数的研究, 重新认为 PCMO 中的 EPIR 效应并非源于界面, 而是样品的本征体效应. 可见, 对锰氧化物中的 EPIR 效应, 无论是其物理本质还是其实际电子过程仍有待进一步研究.

基于前期对陶瓷样品 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 的研究^[22-26], 我们发现这种 EPIR 效应发生在电极-块体接触的界面处, 是一种界面效应, 而且只能发生在电极-块体间的外界面处, 对样品的内界面(晶界/相界)虽也能产生非线性 I - V , 但不能诱发 EPIR. 为进一步探讨锰氧化物界面相关 EPIR 行为, 本文所有实验均采用两线测量模式. 首先对相同掺杂浓度的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 界面 EPIR 效应进行研究, 进而对不同掺杂浓度的 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 系列样品进行探讨, 结果表明, 无论是电子掺杂 ($x > 0.5$) 还是空穴掺杂 ($x < 0.5$), 样品的电极-块体接触界面处都能诱发 EPIR 效应, 并且 EPIR 稳定性与样品载流子浓度高低密切相关: 在半掺杂 ($x = 0.5$) 时, 样品能诱发稳定的 EPIR 行为, 然而, 随碱土掺杂浓度的增加或减低, EPIR 效应逐渐出现减弱、不明显到完全消失的特点.

2 实验方法

本工作所涉及的 $\text{Nd}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($A = \text{Sr}, \text{Ca}, \text{Ba}, x = 0-0.9$) 陶瓷样品均由固相烧结法制备. 为确保测量准确, 先将 SrCO_3 ($\text{CaCO}_3, \text{BaCO}_3$) 和 Nd_2O_3 分别在 400°C 和 900°C 烘烤 4 h, 以除去其中的湿气, 然后将化学计量的 SrCO_3 (CaCO_3 或 BaCO_3)、 Nd_2O_3 和 MnO_2 均匀研磨(添加适量乙醇). 根据文献^[27-31]报道, 选择合适的烧结温

度和保温时间并进行多次研磨、压片及烧结, 最后制成长 $\times$ 宽 $\times$ 高约为 $7.0\text{ mm} \times 3.8\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ 的片状样品以便输运测量. 用 X 射线衍射仪 (XRD, DRON-3 型, Cr- $K(\alpha)$ 辐射) 检测样品晶体结构和相纯度, 除了 $x = 0.6, 0.7, 0.9$ 的成分无法鉴定外, 其他陶瓷样品均具有很好的单相性, 结构为立方或正交结构. 用霍尔效应分析仪 HL5500PC Hall (英国 Accent Optical) 测量样品霍尔系数和载流子浓度. 为尽可能减小实验中出现的误差, 我们在同一样品的同一表面分别制备相同面积的银胶电极, 用长度相近的铜导线作引线, 用 Keithley 2400 万用表测量两线模式下的 EPIR 和 I - V 特性.

3 结果与讨论

前期对锰氧化物 EPIR 的研究, 主要集中在 $R_{0.7}A_{0.3}\text{MnO}_3$ ($R =$ 稀土元素, $A =$ 碱土金属) 的空穴掺杂上, 如 LCMO^[32], LSMO^[33], PCMO^[14], NSMO^[23-26,34] 等. 为研究相同掺杂浓度的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 是否也能诱发 EPIR 效应, 我们首先对它们进行了制备和测试, 其 XRD 分析(如图 1)表明二者均为纯相, 为便于比较, 我们也给出了同批次烧结的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 样品 XRD 谱(图 1(a)). 图 2 是 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 样品的 EPIR 和 I - V 测试结果. 为保证测量条件与前期研究相同, 电压扫描速率均设为 0.1 V/s . 从 I - V 扫描结果可以看到, 无论是 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 还是 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, I - V 曲线均出现非线性行为, 并都存在回滞. EPIR 测试结果表明, 与相同掺杂浓度的 NSMO 一样, 随外载脉冲极性的变化, 这两种

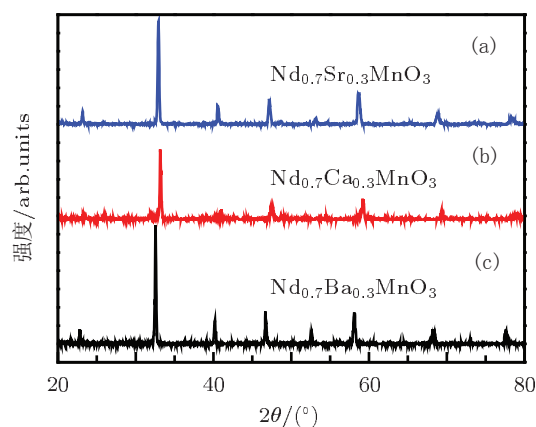


图1 陶瓷样品 XRD 谱

样品电阻都出现高低阻态跳变的 EPIR 行为. 这表明, 锰氧化物中的 EPIR 效应与样品内是否存在内

禀电子相分离无关, 它是电极 - 块体界面所诱导的一种界面效应, 不是材料的内禀属性.

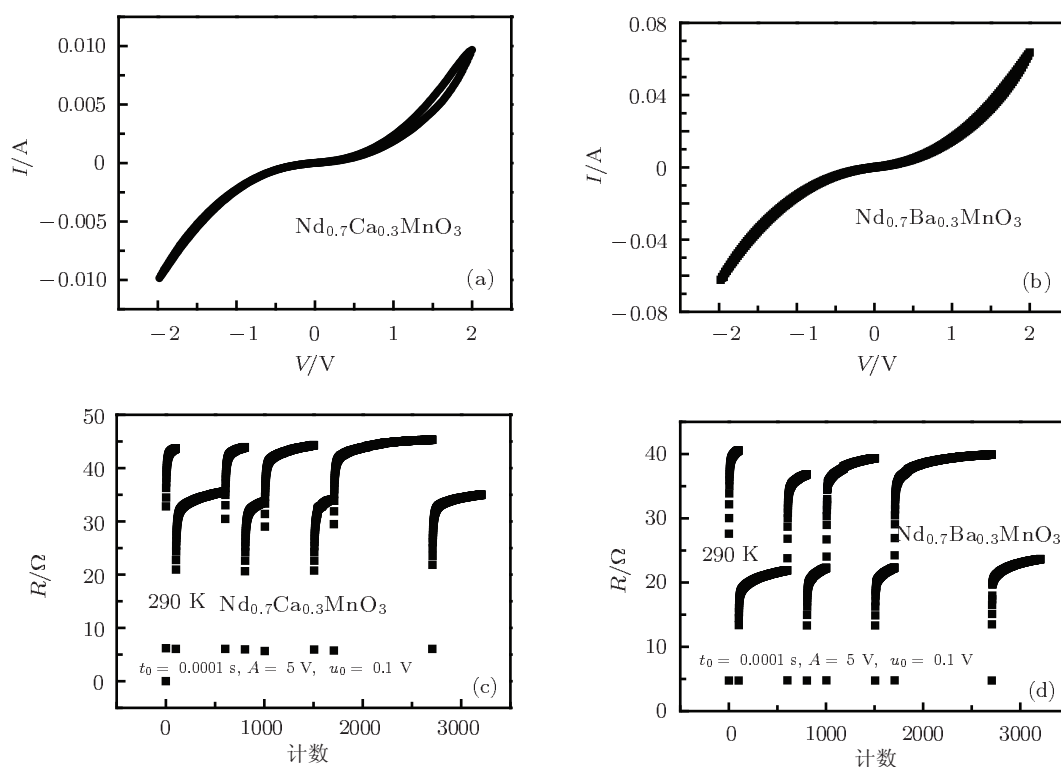


图2 陶瓷样品室温 I - V 和 EPIR 测试结果

化合物 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 与文献报道的 LCMO, PCMO, LSMO 以及 NSMO 等具有相同的化学掺杂浓度, 室温下, 它们的载流子浓度相近, 都能诱发界面 EPIR 行为. 为进一步研究 EPIR 效应与载流子浓度是否相关, 我们用相同的测量条件 (如电压扫描速率、脉冲幅、脉冲宽及偏压值) 对 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0-0.9$) 系列样品进行了测量. 如图 3 所示, 对空穴掺杂系列样品 ($x < 0.5$), 在低掺杂 $x = 0.1$ 时, 其两线电阻较大, 在 2 正 1 负脉冲刺激下, 并未出现 EPIR 行为. 当掺杂浓度 $x = 0.2$ 时, 一个并不明显的 EPIR 效应出现了, 其高、低阻态的界限模糊, 且不稳定, 如图 3(f) 所示. 随着掺杂浓度进一步增大, 如当 $x = 0.3, 0.4$ 时, 出现了明显的 EPIR 效应. 此外, 所有空穴掺杂样品的 I - V 扫描都出现非线性行为, 如图 3(a)—(d). 对于电子掺杂系列样品 ($x > 0.5$), 其 I - V 和 EPIR 测量结果如图 4 所示. 同样地, 我们也观察到类似的变化规律: 随着二价碱土锶掺杂的进一步升高, EPIR 效应逐渐出现减弱、不明显到消失的特点. 如当锶掺杂 $x = 0.6$ 或 0.7 时, 能清楚地观察

到 EPIR 效应, 当掺杂浓度 $x = 0.8$ 时, 高低阻态随脉冲极性变化开始变得模糊, 当掺杂浓度达到 0.9 时, EPIR 效应则完全消失了.

特别地, 对半掺杂样品 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ 和未掺杂母相样品 NdMnO_3 也做了相似测试, 如图 5 所示. 对于半掺杂的陶瓷样品, 我们观察到大的 I - V 回滞和稳定的 EPIR 效应, 室温下其 EPIR 值超过了 100% ($\text{EPIR} = (R_h - R_l)/R_l \times 100\%$), 如图 5(c). 而对于未掺杂样品, 虽然其 I - V 曲线与半掺杂样品相似, 但是并没有 EPIR 效应发生, 如图 5(d).

从这些测量结果我们可以看出, 对于锰氧化物, 无论是电子掺杂还是空穴掺杂, 在两线测量模式下, 都出现非线性 I - V 行为, 而且其电流扫描回路完全相似. 另外, 无论是电子掺杂还是空穴掺杂都可诱发界面相关 EPIR 效应, 而与掺杂类型无关. 同时, 也不是所有的 NSMO 陶瓷样品都能发生稳定的 EPIR 行为, 其稳定性与样品中二价锶的掺杂浓度有关, 太高或太低的掺杂都不利于诱发 EPIR 效应.

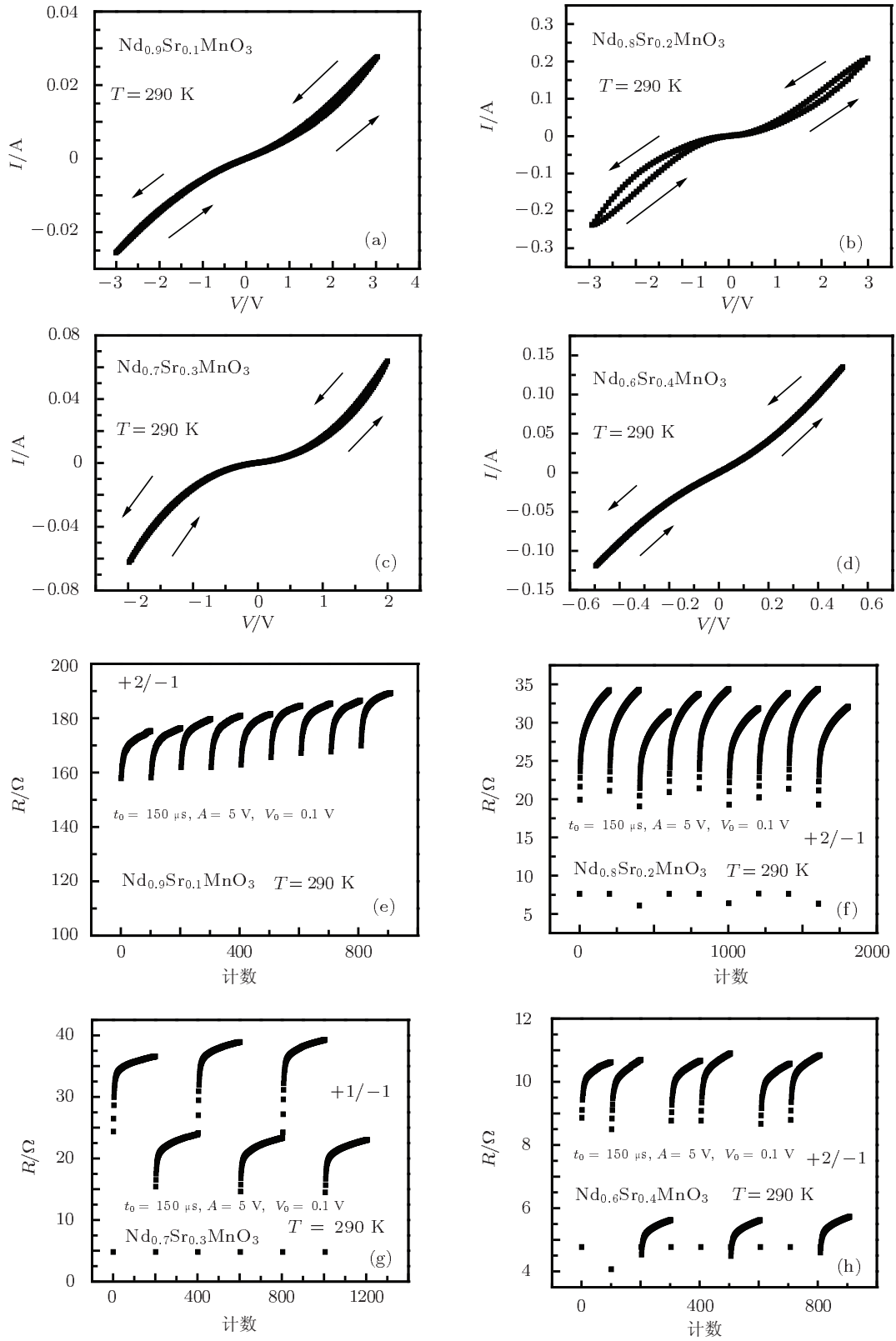


图 3 两线测量模式下, 空穴掺杂样品 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.1-0.4$) 的室温 I - V (a, b, c, d) 和 EPIR (e, f, g, h) 测试结果 (+1/-1 代表 1 个正脉冲后 1 个负脉冲, +2/-1 代表 2 个正脉冲后 1 个负脉冲)

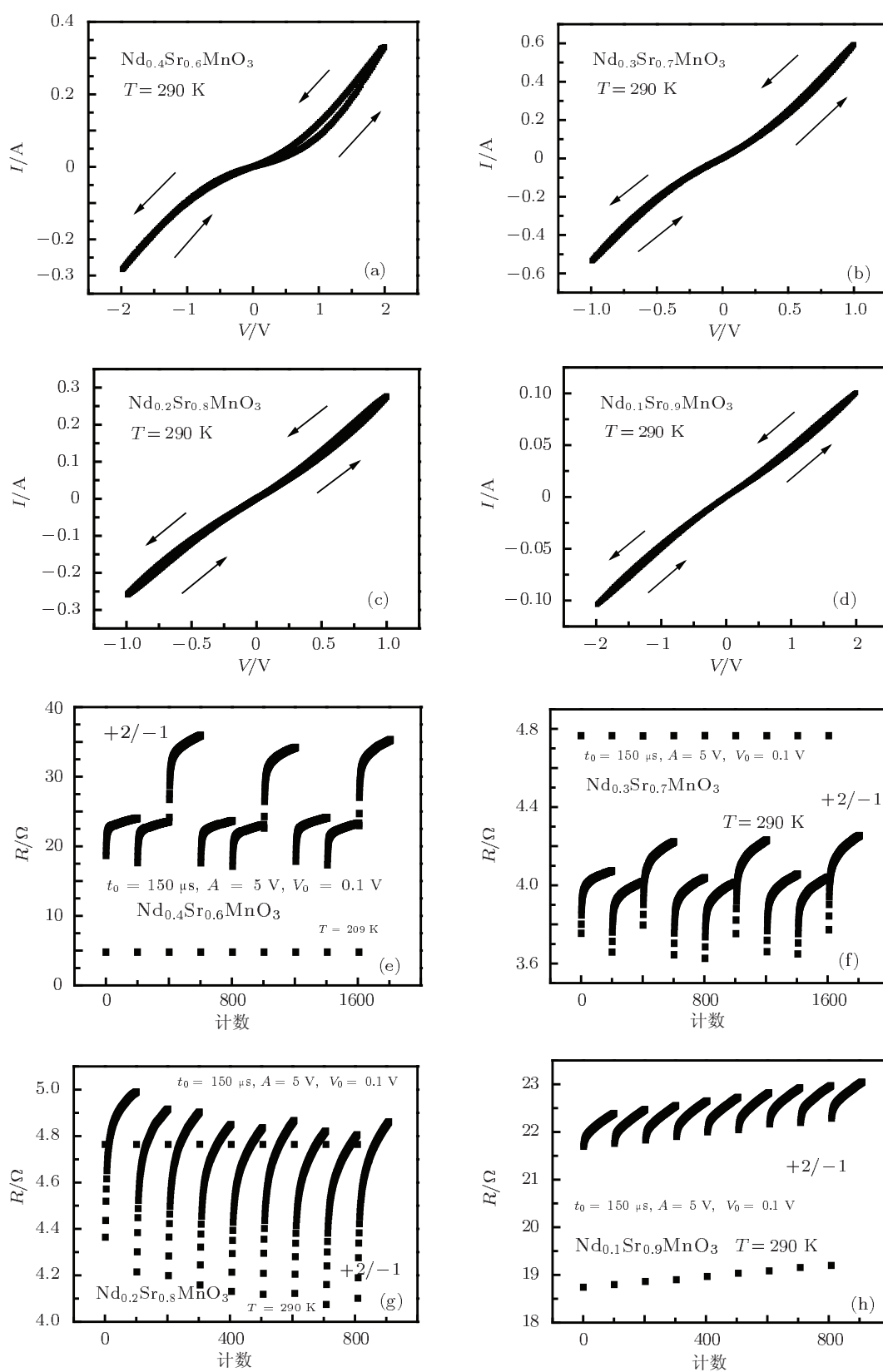


图4 两线测量模式下, 电子掺杂样品 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.6-0.9$) 的室温 I - V (a, b, c, d) 和 EPIR (e, f, g, h) 测试结果 (+2/-1 代表 2 个正脉冲后 1 个负脉冲)

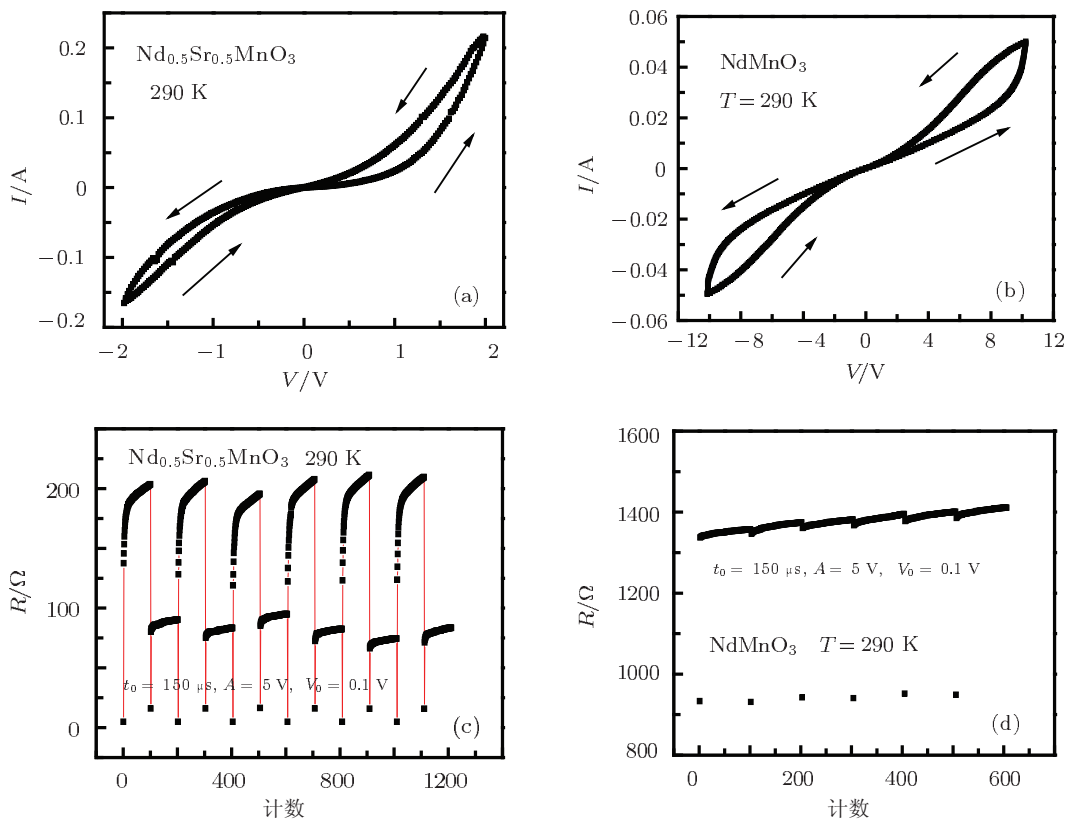


图 5 两线测量下, $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.5, 0.0$) I - V 特性 (a, b) 和 EPIR 效应 (c, d)

表 1 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 样品载流子浓度测量值 (n_1) 和理论值 (n_2) 及两线银电极测试下的 I - V 和 EPIR 特性
(符号“—”表示没有相关文献报道)

特性	电子掺杂 $x > 0.5$				半掺杂		空穴掺杂 $x < 0.5$			未掺杂
	$x = 0.9$	$x = 0.8$	$x = 0.7$	$x = 0.6$	$x = 0.5$	$x = 0.4$	$x = 0.3$	$x = 0.2$	$x = 0.1$	$x = 0$
$n_1/10^{20}\text{ cm}^{-3}$	0.046	1.6	3.9	7.2	5.3	4.9	6.6	2.3	0.19	0.00075
$n_2/10^{20}\text{ cm}^{-3}$	—	9.0	—	—	21	18	13	8.1	4.3	0.000005
I - V 非线性	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
I - V 回滞性	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有
EPIR 特性	无	不明显	有	有	有	有	有	不明显	无	无

对于掺杂半导体, 室温下, 绝大部分的杂质被电离, 掺杂浓度近似等于物质的载流子浓度. 为确证 EPIR 与样品载流子浓度是否存在关联, 我们用霍尔效应分析仪分别测量了 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0.1\text{--}0.9$) 系列样品室温载流子浓度. 根据前期研究^[25] 和半导体理论^[35] 以及文献报道的晶格结构和晶胞参数^[27–31], 不难计算某一掺杂化合物的理论载流子浓度, 将这些值与测得的 I - V , EPIR 结果一并列于表 1. 从表 1 可以看出: 一是对于未掺杂的

母相样品 NdMnO_3 , 具有最低的载流子浓度, 其测量值为 10^{16} cm^{-3} 量级. 对于电子或空穴掺杂的样品, 当二价镧掺杂太低或太高时, 其载流子浓度也都较低, 如 $x = 0.1$ 和 0.9 时, 载流子浓度测量值分别为 10^{19} cm^{-3} 和 10^{18} cm^{-3} 量级, 随掺杂浓度向半掺杂靠近, 样品的载流子浓度逐渐增大, 如当 $x = 0.3$ 和 0.7 时, 其载流子浓度分别为 $6.6 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 和 $3.9 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$, 这些测量值的变化与理论值变化趋势相同 (除 $x = 0.6, 0.7, 0.9$ 样品不知其晶体结

构外); 二是 EPIR 的稳定性随掺杂浓度变化具有明显的规律性, 半掺杂 $x = 0.5$ 是诱发 EPIR 效应的最佳掺杂浓度, 并以此为中心, 随着掺杂浓度的逐渐增加或降低, EPIR 效应逐渐出现减弱、模糊、慢慢消失的特点, 例如当掺杂浓度 $x = 0.3$ 和 0.7 时, 能看到稳定的 EPIR 效应, 当 $x = 0.2$ 和 $x = 0.8$ 时, 样品的 EPIR 逐渐模糊, 继续降低或增大铋的掺杂

浓度, EPIR 效应则消失, 如 $x = 0.1$ 和 $x = 0.9$ 的样品; 三是所有样品在两线测量模式下都出现非线性 $I-V$ 特性, 说明电极与块体的界面处存在接触势垒, 也说明 $I-V$ 非线性只是诱发 EPIR 的必要而非充分条件. 正如图 5(b) 所示, 母相样品 NdMnO_3 的电极 - 块体界面虽能产生非线性 $I-V$, 但无论如何都不能诱发 EPIR 效应.

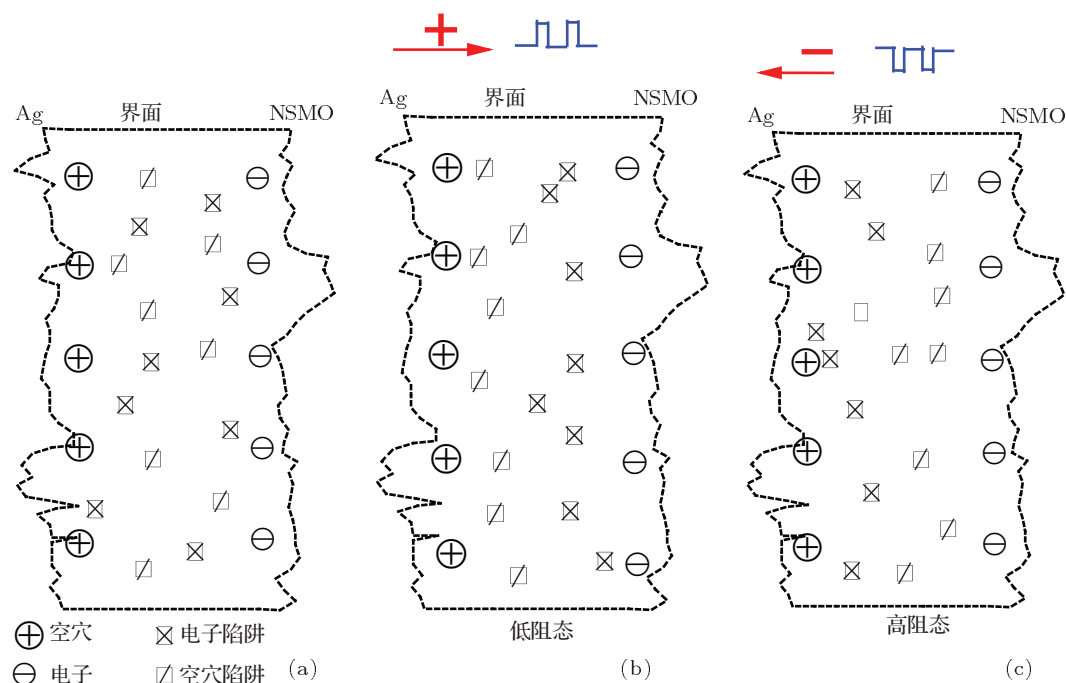


图 6 NSMO 块体 - 银胶接触界面 EPIR 效应示意图

从本质上讲, 物质的电学性能主要取决于构成物质带电微粒的分布和带电粒子在电场中的运动. 对均匀物质而言, 电阻源于晶格热振动 (声子) 和杂质离子的散射, $I-V$ 表现为欧姆线性规律. 但对于非均匀物质而言, 特别是样品内存在内置电场的空间电荷层时, 带电粒子的运动受内置电场的影响而出现非线性 $I-V$ 行为, 这也是在两线测量时常常出现非线性 $I-V$ 和界面电阻的主要原因^[25]. 除此之外, 空间电荷区内的状态 (如颗粒均匀性, 电荷分布等) 对界面输运也有重要影响. 比如当空间电荷层存在深能级缺陷时, 界面输运将变得更复杂, 并有可能诱导产生 EPIR 效应. 在我们当前的电极 - 块体接触界面处, 不可避免地存在各种缺陷, 如优先偏析的杂质离子、氧空位、间隙原子、各种悬挂键以及由显微结构 (如块体表面的微岛、孔隙及几

何平整度) 等引起的各种缺陷. 这些缺陷能够根据自身的特性捕捉载流子而形成所谓的“陷阱”, 处于不同深度的能级位置^[20], 其稳定性与“陷阱”的能级深度和外界温度有关, 并体现在“陷阱”能级释放电子速率的快慢上. 例如在低温时, 被“陷阱”俘获的电子或空穴会呆在“陷阱”位置一段时间, 其时间的长短取决于外界对它的激发, 如外加电磁场、光照、紫外辐射等. 高温时, 被“陷阱”捕获的电子或空穴很快被释放并参与导电, 这些与我们在 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 样品上观察到的实验现象相一致. 另外, 由于这些“陷阱”带电, 所以外界不同极性的电脉冲能影响它们的分布. 如图 6 所示, 在未施加脉冲时, 这些不同电性的“陷阱”以一定的比例存在并杂乱无章, 体系处于热平衡状态, 整个样品和界面呈电荷中性, 如图 6(a) 所示; 当施加一定频率

和幅度的正脉冲时, 这些界面中的带电“陷阱”粒子便在脉冲的激励下发生微小偏移运动, 并实现重新分布, 形成一个与空间电荷区内电场相反的小电场(相当于降低了原来的内建电场). 此时, 若用小偏压来测量, 其界面电阻为一低阻态, 如图 6(b) 所示; 当施加相反极性的脉冲时, 这些“陷阱”离子又重新分布并形成与内建电场方向相同的小电场(相当于升高了原来的内建电场), 此时界面的电阻为高阻态, 如图 6(c) 所示. 然而, 必须指出, “陷阱”浓度高低与掺杂浓度密切相关. 当实施较低浓度掺杂时, “陷阱”的浓度也较低, 在外界脉冲激励下产生的由正负“陷阱”形成的电场值太小, 所以, 在不同极性的外脉冲激励后, 样品的界面电阻变化很小, 甚至不变化. 相反, 如果“陷阱”的浓度随掺杂浓度的升高而达到一个足够大的值时, 不同电性“陷阱”在正负脉冲激励后所产生的电场值也较大, 并能够实现增强或减弱原来的内建电场而出现如前所述的高低阻态随脉冲极性的变化. 在诱发 EPIR 的过程中, 由于原来的内建电场是不同带电离子实在界面两侧有规律分布形成, 因此, 电脉冲对原来电荷区内建电场的影响很小. 另外, 偏压大小对内建电场也

有影响, 一旦增大偏压的值, 内建电场便受偏压的影响使原来稳定的 EPIR 变得不稳定甚至消失^[24], 这也是我们在讨论偏压对 EPIR 稳定性影响时所强调的偏压必须为一小电场的原因.

4 结 论

通过对固相烧结方法制备的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ 和 $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ 样品 EPIR 行为和 I - V 特性的研究, 发现这两种化合物与化学掺杂浓度相同的 $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 一样具有非线性 I - V , 并出现稳定的 EPIR 效应. 进一步对 $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 系列样品的研究发现, EPIR 效应的稳定性与化学掺杂浓度有关. 在半掺杂附近, 能诱发稳定的 EPIR 效应, 随掺杂浓度的进一步升高或降低, EPIR 效应则逐渐出现减弱、模糊到完全消失的变化规律. 这些现象也表明, 无论锰氧化物是电子掺杂还是空穴掺杂, 且无论是否存在内禀电子相分离, 都能诱发界面相关的 EPIR 效应, 这一结果与我们前面的研究结论相符, 是对前期工作的拓展和深入.

- [1] Zener C 1951 *Phys. Rev.* **82** 403
- [2] Kanamori J 1960 *J. Appl. Phys.* **31** 14S
- [3] Jonker G H, van Santen J H 1950 *Physica* **16** 337
- [4] Jahn H A, Teller E 1937 *Proc. Roy. Soc. A* **161** 220
- [5] Tan G T, Chen Z H, Zhang X Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 379 (in Chinese) [谈国太, 陈正豪, 章晓中 2005 物理学报 **54** 379]
- [6] Coey M 2005 *Nature Mater.* **4** 9
- [7] Wang S B, Zhang J C, Cao G X, Yu J, Jing C, Cao S X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 367 (in Chinese) [王仕鹏, 张金仓, 曹桂新, 俞坚, 敬超, 曹世勋 2006 物理学报 **55** 367]
- [8] Li B H, Xianyu W X, Wan X, Zhang J, Shen B G 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1366 (in Chinese) [李宝河, 鲜于文旭, 万欣, 张健, 沈保根 2000 物理学报 **49** 1367]
- [9] Yang C P, Chen S S, Dai Q, Guo D H, Wang H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4908 (in Chinese) [杨昌平, 陈顺生, 戴琪, 郭定和, 王浩 2007 物理学报 **56** 4908]
- [10] Chen S S, Yang C P, Deng H, Sun Z G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3798 (in Chinese) [陈顺生, 杨昌平, 邓恒, 孙志刚 2008 物理学报 **57** 3798]
- [11] Chen S S, Yang C P, Wang H, Medvedeva I V, Bärner K 2010 *Mat. Sci. Eng. B* **172** 167
- [12] Liu S Q, Wu N J, Ignatiev A 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2749
- [13] Tsui S, Baikalov A, Cmaidalka J, Sun Y Y, Wang Y Q, Xue Y Y, Chu C W, Chen L, Jacobson A J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 317
- [14] Odagawa A, Sato H, Inoue I H, Akoh H, Kawasaki M, Tokura Y, Kanno T, Adachi H 2004 *Phys. Rev. B* **70** 224403
- [15] Rozenberg M J, Inoue I H, Sanchez M J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 178302
- [16] Kim D C, Seo S, Ahn S E, Suh D S, Lee M J, Park B H, Yoo I K, Baek I G, Kim H J, Yim E K, Lee J E, Park S O, Kim H S, Chung U I, Moon J T, Ryu B I 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 202102
- [17] Sawa A, Fujii T, Kawasaki M, Tokura Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **18** 4073
- [18] Yang R, Li M X, Yu W D, Gao X D, Shang D S, Liu X J, Cao X, Wang Q, Chen L D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 072105
- [19] Baikalov A, Wang Y Q, Shen B, Lorenz B, Tsui S, Sun Y Y, Xue Y Y, Chu C W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 957
- [20] Shang D S, Wang Q, Chen L D, Dong R, Li X M, Zhang W Q 2006 *Phys. Rev. B* **73** 245427
- [21] Aoyama K, Waku K, Asanuma A, Uesu Y, Katsufuji T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 1208
- [22] Chen S S 2010 *MS Dissertation* (Wuhan: Hubei University) (in Chinese) [陈顺生 2010 硕士学位论文 (武汉: 湖北大学)]
- [23] Chen S S, Yang C P, Xu L F, Yang F J, Wang H B, Wang H, Xiong L B, Yu Y, Medvedeva I V, Bärner K 2010 *Solid State Commun.* **150** 240
- [24] Chen S S, Yang C P, Ren C L, Wang R L, Wang H, Medvedeva I V, Baerner K 2011 *Bull. Mater. Sci.* **34** 1
- [25] Chen S S, Huang C, Wang R L, Yang C P, Medvedeva I V, Sun Z G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 037304 (in Chinese) [陈顺生, 黄昌, 王瑞龙, 杨昌平, Medvedeva I V, 孙志刚 2011 物理学报 **60** 037304]

- [26] Yang C P, Chen S S, Dai Q, Song X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 117202 (in Chinese) [杨昌平, 陈顺生, 戴琪, 宋学平 2011 物理学报 **60** 117202]
- [27] Pattabiraman M, Murugaraj P, Rangarajan G, Dimitropoulos C, Ansermet J P, Papavassiliou G, Balakrishnan G, Paul D M, Lees M R 2002 *Phys. Rev. B* **66** 224415
- [28] Tarashita H, Neumeier J J 2005 *Phys. Rev. B* **71** 134420
- [29] Chen P, Du Y W 2005 *Chin. J. Phys.* **39** 357
- [30] Reinaldo Azevedo Vargas, Rubens Chiba, Marco Andreoli, Emilia Satoshi Miyamaru Seo 2010 *Mater. Sci. Forum* **660–661** 1113
- [31] Woodward P M, Cox D E, Vogt T, Rao C N R, Cheetham A K 1999 *Chem. Mater.* **11** 3528
- [32] Zhang T, Su Z H, Chen H J, Ding L H, Zhang W F 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 172104
- [33] Xie Y W, Sun J R, Wang D J, Liang S, Shen B G 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 033704
- [34] Morchshakov V, Annaorazov M P, Aybar H S, Yang C P, Troyanchuk I O, Barner K 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 063704
- [35] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2008 *Semiconductor Physics* (the 7th edition) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp63–70 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 2008 半导体物理学 (第 7 版)(北京: 电子工业出版社) 第 63—70 页]

Effect of doping concentration on electric-pulse-induced resistance in $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ceramics*

Chen Shun-Sheng¹⁾²⁾ Yang Chang-Ping^{2)†} Xiao Hai-Bo²⁾
Xu Ling-Fang²⁾ Ma Chang¹⁾

1) (School of Mathematics and Physics, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China)

2) (Faculty of Physics and Electronic Technology, Hubei University, Wuhan 430062, China)

(Received 14 December 2011; revised manuscript received 28 December 2011)

Abstract

Electric-pulse-induced resistances (EPIRs) and I - V characteristics of polycrystalline $\text{Nd}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($A = \text{Ca}, \text{Ba}, \text{Sr}, x = 0-0.9$) ceramics synthesized by solid state reaction are investigated. The results show that similar to $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, compounds $\text{Nd}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ and $\text{Nd}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, with the same doped concentration as that of $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, each can also exhibit a nonlinear I - V behaviour and a stable EPIR effect at room temperature. Further studies on the $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ series indicate that the stability of EPIR is closely correlated with the Sr doped concentration. Around the half doping $x = 0.5$, the EPIR effect can be observed stably. With Sr concentration increasing or decreasing, however, the EPIR becomes weaker gradually and disappears completely if Sr concentration further increases or decreases. The redistribution of various defects between the electrode and bulk interface with polar pulses is proposed to explain the unique transport behaviour.

Keywords: electric-pulse-induced resistance, deep-level trap defects, manganite, I - V nonlinearity

PACS: 73.40.-c, 73.20.-r

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074067, 11174073) and the Ministry of Education of China (Grant No. NCET-08-0674).

† E-mail: cpyang@hubei.edu.cn