

光电协同增强的场效应对LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>界面中持续光电导的调控

刀流云 张子涛 肖煜同 张明昊 王帅 何 贾金山 余乐军 孙波 熊昌民

Light-enhanced gating effect on the persistent photoconductivity at LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface

Dao Liu-Yun Zhang Zi-Tao Xiao Yu-Tong Zhang Ming-Hao Wang Shuai He Jun Jia Jin-Shan Yu Le-Jun Sun Bo Xiong Chang-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 067302 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182204

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182204>

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

[Sr掺杂对La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>界面电子结构的影响](#)

Effect of Sr doping on electronic structure of La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>/LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterointerface

物理学报. 2017, 74(18): 187301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.187301>

[不同组分厚度比的LaMnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub>异质界面电子结构和磁性的第一性原理研究](#)

First-principles study of the electronic properties and magnetism of LaMnO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterointerface with the different component thickness ratios

物理学报. 2016, 73(7): 077301 <https://doi.org/10.7498/aps.65.077301>

[La施主掺杂SrTiO<sub>3</sub>单晶的阻变性能研究](#)

Resistance switching of La doped SrTiO<sub>3</sub> single crystals

物理学报. 2018, 75(18): 187303 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180904>

[应力下SmNiO<sub>3</sub>钙钛矿氧化物薄膜材料的电导与红外光电导](#)

Electrical conductivity and infrared ray photoconductivity for lattice distorted SmNiO<sub>3</sub> perovskite oxide film

物理学报. 2019, 68(2): 026701-1 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181513>

[表面吸附K原子的多层FeSe/SrTiO<sub>3</sub>\(001\)薄膜的抗磁响应的原位测量](#)

In-situ measurement of diamagnetic response of potassium-adsorbed multi-layer FeSe ultrathin films on SrTiO<sub>3</sub>(001) substrate

物理学报. 2018, 75(22): 227401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181522>

# 光电协同增强的场效应对 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面中持续光电导的调控\*

刀流云<sup>1)</sup> 张子涛<sup>1)</sup> 肖煜同<sup>1)</sup> 张明昊<sup>1)</sup> 王帅<sup>1)</sup> 何琚<sup>2)</sup>  
贾金山<sup>1)</sup> 余乐军<sup>2)</sup> 孙波<sup>2)</sup> 熊昌民<sup>1)†</sup>

1) (北京师范大学物理学系, 北京 100875)

2) (北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875)

(2018年12月14日收到; 2019年1月20日收到修改稿)

$\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  异质结界面体系具有新奇的二维自由电子气现象、暂态光电导效应、持续光电导效应等丰富的光电性质, 是近年来科学界研究的热点之一. 本文研究了场效应对  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  界面光电导效应的调控, 发现光电协同增强的场效应可以使得  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  界面产生显著的持续光电导效应, 进一步研究发现: 在光电协同效应的影响下, 随着负的背栅门电压的增加, 持续光电导的数值增大, 在  $-70\text{ V}$  附近达到极值; 随着负的背栅门电压处理时间的增加, 持续光电导的数值单调增加.  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  异质结中这种场增强的持续光电导效应可为多参数可调的光电子记忆器件的研发提供参考依据.

**关键词:**  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  界面, 持续光电导, 光照, 场效应

**PACS:** 73.40.-c, 77.84.Cg, 72.40.+w

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182204

## 1 引言

光电导效应是材料电阻 (或电导) 在光照影响下发生改变的一种现象. 持续光电导效应是光电导效应的一种, 具体指的是材料的电阻 (或电导) 在去掉光照后不能恢复到光照前初始值的一种现象. 利用光电导效应可以实现光电信号的转变, 尤其是利用持续光电导效应还能实现信息记忆功能. 因此基于光电导效应可将材料开发成各种光电导器件, 在光电跟踪、导弹制导、信息传感与记录等各领域展现出了巨大的应用前景. 然而, 随着时代的发展, 人们对各种电子器件的性能、功能、可调性等方面始终有着更高的需求. 在光电导器件的研究方面, 目前的一个主要趋势是寻找新型光电导材料或探

究新的控制手段, 以期提高或实现多参数可调的光电导效应.

近年来,  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  (LAO/STO) 异质结界面因其具有独特的二维自由电子气性质而受到科学界的广泛关注<sup>[1-10]</sup>. 此外, 在 LAO/STO 界面还发现了暂态光电导效应、持续光电导效应以及暂态、持续共存的光电导效应等丰富的光电性质<sup>[11-17]</sup>. 这些性质进一步展现了 LAO/STO 界面在光电子领域的广阔应用前景. 因此, 光电导效应也是该 LAO/STO 异质结研究中的热点之一. 然而, 在 LAO/STO 的光电导的调控研究中, 目前常用的手段是化学掺杂 (如氧空位或杂质插层等), 物理手段 (如电场或应力等) 则较少被采用. 值得注意的是, Lei 等<sup>[18]</sup> 在 LAO/STO 界面中发现了光诱导增强的场效应, 即光电协同增强的场效应. 这种光

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0405101) 和国家自然科学基金 (批准号: 11474024) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cmxiong@bnu.edu.cn

电协同效应实质上反映了 LAO/STO 中的光激发与场效应间有强的关联性. 但是, 更进一步地, 是否能用场效应手段 (包括光电协同增强的场效应) 来调控该异质界面的光电导效应呢? 这一问题目前仍缺乏研究. 基于此, 本文研究了场效应对 LAO/STO 异质结的光电导效应的影响, 结果发现通过光电协同增强的场效应能显著提高 LAO/STO 界面中的持续光电导效应. 这种场控增强的持续光电导效应, 在以往的文献中未见报道, 其在新场调控的光电子记忆器件的研发方面具有潜在价值.

## 2 实验方法

本文所用 LAO/STO 异质结样品的结构如图 1 所示. 其中 LAO 薄膜为采用脉冲激光沉积方法制备的薄膜, STO(100) 为该 LAO 薄膜衬底. LAO 薄膜制备时的氧分压为  $3.3 \times 10^{-5}$  Torr ( $1 \text{ Torr} = 1.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$ ), 温度为  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ . 通过设定制膜时间, LAO 薄膜厚度控制约为  $2 \text{ nm}$ . X 射线衍射实验证明本文所制备的 LAO 薄膜为外延生长, 结晶质量良好. 采用超声压焊方法在 LAO 表面和 STO 背面焊接了 Al 电极. 超声压焊焊接的 Al 电极穿透深度一般为微米级. Al 电极与 LAO/STO 异质界面的接触电阻小于  $50 \text{ } \Omega$ . 其中, LAO 薄膜中有 Al 电极 1, 2, 3, 4 和 5, 衬底 STO 背面有 Al 电极 6. 实验采用背栅法以实现场效应测量, 即: 在 3 和 6 电极之间加栅压, 其中 3 电极接地, 6 电极上加门电压  $V_{\text{gate}}$ .

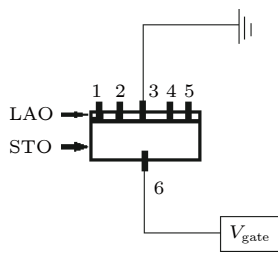


图 1 LAO/STO 测量接线示意图

Fig. 1. Sketch of the experimental setup of the LAO/STO device.

利用四点法测 LAO/STO 异质结电阻. 其中 1 和 5 电极间通电流, 2 和 4 电极间测电压. 为测量 LAO/STO 的光电导效应, 选用波长为  $405 \text{ nm}$  的连续激光器作光源. 光照面积约为  $4 \text{ mm}^2$ , 光照

范围在 LAO 表面上的 2 到 4 电极之间.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 LAO/STO 的电学性质表征与场效应

首先测量了 LAO/STO 异质结界面电阻 ( $R$ ) 随温度 ( $T$ ) 的变化. 其结果如图 2 所示,  $R$  与  $T$  呈现正相关, 表明本文所制备得的异质界面具有良好的金属导电性, 这与文献 [1—10] 报道的结果类似. 其导电性一般被认为来源于 LAO/STO 界面层中电子型载流子的跃迁.

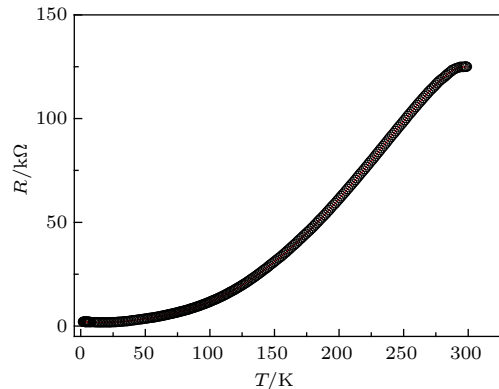


图 2 LAO/STO 样品的界面  $R$ - $T$  特性曲线

Fig. 2.  $R$ - $T$  curve measured at LAO/STO interface.

然后, 分别测量了该 LAO/STO 异质结界面电阻  $R$  在无光照和有光照影响下的场效应. 其中, 场效应中的门电压通过背栅法施加 (见图 1 中的接线示意图). 测得的 LAO/STO 界面电阻  $R$  与门电压 ( $V_{\text{gate}}$ ) 随时间 ( $t$ ) 的变化结果分别在图 3(a) 与图 3(b) 中给出. 图 3(a) 中黑色线表示的为不施加光照时  $R$  随  $t$  以及  $V_{\text{gate}}$  的变化. 初始时异质结的电阻约为  $135 \text{ k}\Omega$ . 从  $220 \text{ s}$  到  $430 \text{ s}$ , 施加负向栅压  $100 \text{ V}$ . 在此期间, 界面电阻略有上升, 在测试时间内达到  $145 \text{ k}\Omega$ ; 去掉栅压, 电阻恢复到初始态. 在  $600 \text{ s}$  后加上正向栅压  $100 \text{ V}$ , 电阻略微降低, 并稳定在  $130 \text{ k}\Omega$  附近. 根据上述结果算得负向栅压场效应对 LAO/STO 界面电阻的调控幅度在  $7.4\%$  左右. 正向栅压的调控则不明显, 调控幅度约小于  $4\%$ .

再用功率为  $30 \text{ mW}$  的  $405 \text{ nm}$  连续激光照射样品, 研究了光照对场效应的影响. 施加正负门电压的顺序与上述不施加光照时的情形相同, 其结果如图 3(a) 红色线条所示. 开始时门电压为  $0 \text{ V}$ , 电

阻趋于稳定值 119 k $\Omega$ ; 220 s 处施加 -100 V 的门电压, 电阻值迅速上升到 388 k $\Omega$ , 在测量时间段内电阻未达到稳定态; 去掉门电压, 电阻降低并恢复到初始的 119 k $\Omega$  附近. 在 600 s 时施加 +100 V 门电压, 电阻降低, 并且趋于稳定值 111 k $\Omega$ ; 去掉门电压, 电阻升高, 并且恢复到 119 k $\Omega$  附近. 根据上述结果, 算得负向栅压场效应在有光照的情况下对界面电阻的调控幅度在 226% 左右. 正向栅压的调控不明显, 约为 6.7%. 从上述  $R$  的相对变化幅度比较可见, 光照能显著增强 LAO/STO 异质结中的场效应, 即呈现光电协同增强的场效应, 这与文献 [18] 报道的结果类似.

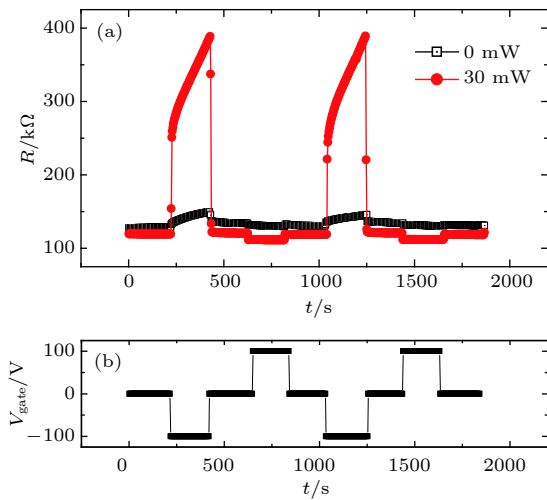


图 3 LAO/STO 界面电阻  $R$  与门电压  $V_{\text{gate}}$  随时间  $t$  的变化 (a) 在不同光照下  $R$  随  $t$  的变化; (b)  $V_{\text{gate}}$  随  $t$  的变化  
Fig. 3. Time dependence of resistance  $R$  and gate voltage  $V_{\text{gate}}$  of LAO/STO: (a) Time dependence of  $R$  under different light illumination; (b) time dependence of gate voltage.

根据 LAO/STO 中场效应的光电协同机制 [18], 若在施加负门电压的同时施加光照, 光照将促进 STO 中氧空位往电极 6 附近移动, 使 STO 界面的晶格发生膨胀并产生晶格畸变, 破坏其结构的对称性, 从而在 STO 的界面附近产生铁电极化 [18–20]. STO 界面的铁电极化会对 LAO/STO 界面的载流子浓度有额外的调控作用, 从而能提高其场效应 [18]. 显然, 这种光电协同增强的场效应与常规的场效应有显著的不同, 因为后者只是通过电容效应调控导电层的载流子浓度.

由于光照影响下的场效应对 LAO/STO 界面电阻的调控更为显著, 因此本文将主要研究这种光电协同增强的场效应对 LAO/STO 异质结界面的光电导效应的影响.

## 3.2 LAO/STO 异质结界面光电导效应的场调控效应

### 3.2.1 无门电压影响时, LAO/STO 异质结界面的光电导效应

首先研究了无门电压影响下 LAO/STO 的光电导效应. 为测量 LAO/STO 异质结的光电导效应, 实验仍选用 30 mW 的 405 nm 连续激光照射异质结的表面. 利用四电极法测量 LAO/STO 异质结界面电阻  $R$  随时间  $t$  的变化, 其结果如图 4 所示.

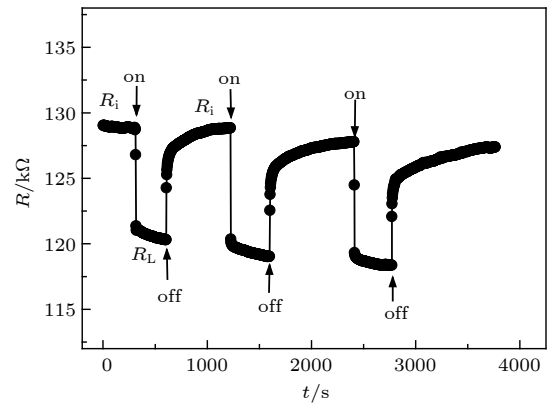


图 4 光照对 LAO/STO 界面电阻  $R$  的影响, 图中“on”和“off”分别代表光照的开和关  
Fig. 4. Effect of light illumination on the LAO/STO resistance. “on” and “off” represent the switch on and off of the illumination, respectively.

从图 4 可见, 无光照时, 初始的电阻稳定电阻约为 129 k $\Omega$ , 该电阻被定义为  $R_i$ . 在 320 s 时开始施加光照. 可看到, 在光照开启的同时电阻迅速下降. 经过一段时间后电阻达到稳定值, 约为 119 k $\Omega$ , 该电阻被定义为  $R_L$ . 去掉光照后, 电阻又快速上升, 并将恢复到  $R_i$ . 该现象即为暂态正光电导效应. 其光电导 (photoconductivity, PC) 数值定义为

$$PC = \frac{R_i - R_L}{R_i}. \quad (1)$$

据 (1) 式算得 LAO/STO 的 PC 数值约为 7.7%. 随后再多次施加光照, 电阻在  $R_i$  和  $R_L$  之间变化, 说明该异质结的正光电导具有好的重复性. 一般认为, LAO/STO 界面层中光生载流子的出现是导致其中产生正光电导效应的原因 [11–17].

### 3.2.2 负门电压影响下 LAO/STO 异质结界面中的持续光电导效应

考虑到 LAO/STO 的光电协同增强的场效应

主要发生在负的门电压区, 因此在本节及下文, 将着重探究负门电压区的光电协同的场效应对 LAO/STO 界面光电导效应的影响. 首先研究的是  $V_{\text{gate}} = -30 \text{ V}$  的门电压与光照的协同效应对光电导效应的影响, 其中照射光源与上节所述相同.

具体实验过程如下: 首先测量不施加门电压和光照时 LAO/STO 的界面电阻  $R$  随时间  $t$  的变化, 结果在图 5 中给出.  $R$  稳定时的初始电阻值记为  $R_0$ , 约  $130 \text{ k}\Omega$ , 为该异质结的初始电阻. 然后, 从  $500 \text{ s}$  开始同时施加门电压和光照, 其中门电压  $V_{\text{gate}} = -30 \text{ V}$ . 从图 5 可见, 同时施加光照与栅压后, LAO/STO 的界面电阻  $R$  上升显著, 约增加到  $145\text{--}160 \text{ k}\Omega$ . 栅压与光照的协同处理时间共  $150 \text{ s}$ . 在第  $650 \text{ s}$  去掉光照和门电压,  $R$  缓慢下降, 直到稳定在一个新的电阻值  $R_n$  附近,  $R_n$  约为  $137 \text{ k}\Omega$ . 可见  $R_n$  大于  $R_0$ , 这说明 LAO/STO 界面进入了一个高于初始电阻  $R_0$  的新的电阻态, 即  $R_n$  电阻态. 然后, 再用相同的光源第二次照射该异质结, 进一步研究该新电阻态  $R_n$  的光电导效应. 发现激光照射后, LAO/STO 界面电阻从  $R_n$  处迅速减小到  $R_L$  附近 (见图 5 中  $830\text{--}1460 \text{ s}$  区间的电阻变化), 表现出正的光电导效应. 值得注意的是, 此时再去掉光照, LAO/STO 的界面电阻不能恢复到电阻态  $R_n$  附近, 而只是恢复到  $130 \text{ k}\Omega$  附近, 该电阻与  $R_0$  相当, 然而明显小于  $R_n$ . 为清楚起见, 图 5

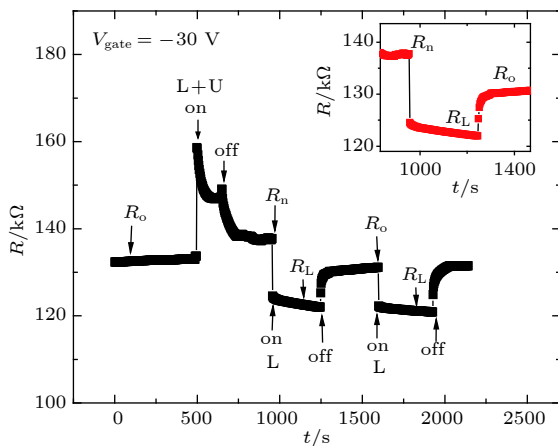


图 5 LAO/STO 界面  $R$  随  $t$  的变化, 其中测量期间, 门电压或光照来回“开”和“关”; 图中, “L”代表加光照, “U”代表加电压; “on”和“off”分别代表门电压或光照的开和关; 内插图为  $830\text{--}1460 \text{ s}$  区间的放大图

Fig. 5.  $R$  of the LAO/STO interface as a function of response time while the gate voltage (marked by “U”) and light illumination (marked by “L”) is switched on and off. Inset is a close view of the  $R$ -time curve between  $830 \text{ s}$  and  $1460 \text{ s}$ .

中的内插图给出了光照前后  $R_n$  与  $R_0$  的对比. 该实验实际上表明在 LAO/STO 界面出现新的电阻态  $R_n$  后, 光照使得该异质结出现了明显的持续光电导效应, 即光照后的电阻与光照前的电阻不相等.

定义持续光电导 (persistent photoconductivity, PPC) 的数值为

$$PPC = \frac{R_n - R_0}{R_n}. \quad (2)$$

由 (2) 式可得到  $-30 \text{ V}$  栅压处理后 PPC 约为  $5.1\%$ .

此外, 根据 (1) 式, 还计算了 LAO/STO 界面经上述场效应处理后的正光电导的数值 (利用  $R_0$  代替公式中的  $R_i$ ), 约为  $7.2\%$ , 与场效应处理前的数值基本相当. 这说明场效应对 LAO/STO 的正光电导效应的影响不明显.

显然, 经过上述光电协同的场效应处理后, LAO/STO 界面所产生的显著的持续光电导效应是本文最重要的发现. 基于上述实验过程, 可得到 LAO/STO 界面出现持续光电导的原因应是实验过程中负的门电压及光照的共同处理有关. 再根据 LAO/STO 的场效应结果及其中的光电协同机制<sup>[18]</sup>, 在同时施加负的门电压与光照时, LAO/STO 界面中的氧空位将往 STO 的电极 6 一侧扩散, 并且界面层中的载流子浓度将降低. 若同时去掉光照和门电压, 虽然有部分氧空位扩散回到 LAO/STO 的界面一侧, 但是仍可能有部分氧空位及束缚的载流子留在 STO 中. 因此 LAO/STO 界面电阻仍将稳定在一个较高的电阻态 ( $R_n$ ) 上. 再施加第二次光照, 氧空位束缚的载流子被激发到导带上. 在 LAO/STO 界面能带弯曲的影响下, 这些光生载流子能快速扩散到界面的沟道层当中. 同时, 处于电离态的氧空位也因其其在 STO 晶格中的束缚能降低而更容易扩散回界面层<sup>[18]</sup>. 因此, 在第二次光照后, LAO/STO 的界面层电阻也将容易从电阻态  $R_n$  恢复到原有的电阻态  $R_0$  附近, 从而导致光照前后的电阻不相等, 产生持续光电导效应.

需要特别指出的是, 在图 3 的场效应实验中, 我们未观察到新的电阻态  $R_n$ . 其原因正是在图 3 的实验过程一直有光照影响. 因此, 在去掉门电压后, 该异质结的界面电阻在光照的影响下容易恢复到加门电压前的状态.

### 3.2.3 负的门电压大小对 LAO/STO 界面持续光电导的调控

在本节中, 进一步探究负向栅压大小对 LAO/

STO 界面的持续光电导的调控. 实验中的光照条件与上一节相同, 其中栅压与光照的协同处理时间

仍为 150 s, 所得的几种典型的  $R-t$  测量结果在图 6 中给出.

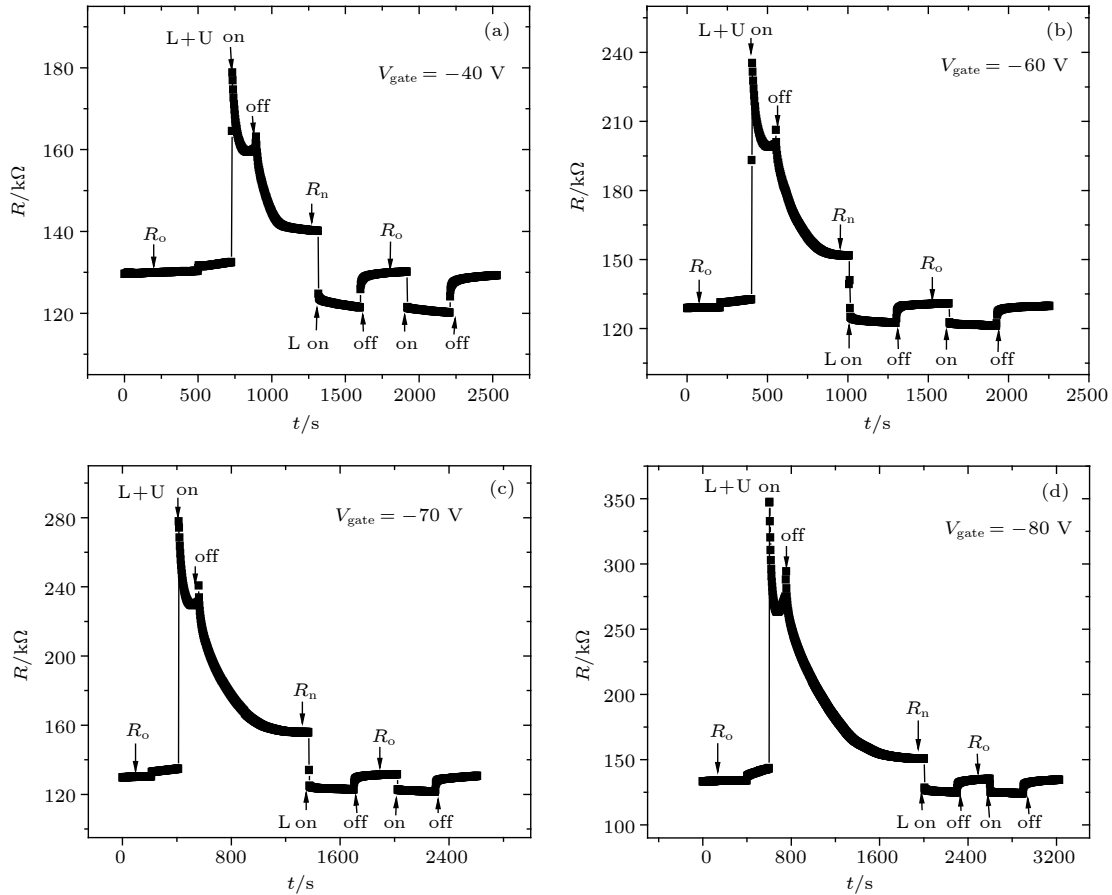


图 6 LAO/STO 界面  $R$  分别经不同栅压处理后的随  $t$  变化, 其中测量期间, 门电压或光照来回“开”和“关”(图中, “L”代表加光照, “U”代表加电压; “on”和“off”分别代表门电压或光照的开和关) (a)  $-40$  V; (b)  $-60$  V; (c)  $-70$  V; (d)  $-80$  V

Fig. 6. Time dependences of  $R$  of the LAO/STO interface after the processing of various gate voltages while the gate voltages (marked by “U”) and light illumination (marked by “L”) are switched on and off: (a)  $-40$  V; (b)  $-60$  V; (c)  $-70$  V; (d)  $-80$  V.

从图 6 可见, 经过不同的栅压处理后, LAO/STO 的界面电阻都进入一个高于初始值  $R_0$  的稳定中间电阻态  $R_n$ . 再次施加光照影响后, 界面电阻都能从  $R_n$  恢复到初始电阻  $R_0$  附近.  $R_n$  与  $R_0$  的差别反映了持续光电导的大小. 由于经不同栅压及光照处理后的  $R_0$  基本不变, 因此 PPC 随  $V_{\text{gate}}$  的变化主要由  $R_n-V_{\text{gate}}$  关系决定. 根据上述电阻测量, 可定出  $R_n$  随  $V_{\text{gate}}$  的变化, 结果在图 7 内插图中示出. 相应地, 根据 (2) 式计算得的 PPC 值也在图 7 中示出. 从图 7 可见,  $R_n$  随负栅压的增大而增大, 并在  $V_{\text{gate}} = -70$  V 时达到最大值. 同时, PPC 也随  $-V_{\text{gate}}$  的增加而增加, 在  $V_{\text{gate}} = -70$  V 时达极大值, 约为 17%. 此后,  $R_n$  和 PPC 都随门电压的增加而减小.

根据 LAO/STO 在光照下的场效应结果可知

PPC 和  $R_n$  随门电压增加的原因为: 当负的门电压越大时, LAO/STO 界面层中的氧空位和载流子往 STO 的电极 6 一侧迁移越多, LAO/STO 的界面电阻增加也越大. 去掉光照和门电压后, 界面电阻  $R_n$  一般也应保持越大. 相应地, PPC 值也增大. 然而,  $R_n$  以及 PPC 在  $-70$  V 处出现极值后下降的机制尚不明确, 这有待进一步研究.

### 3.2.4 光电协同处理时间对 LAO/STO 界面持续光电导的调控

本文进一步研究门电压与光照的协同处理时间 ( $t_d$ ) 对光电导的影响. 光电协同处理和测量过程与上一节类似, 仍选择照射光为 30 mW 的 405 nm 激光, 选择的门电压  $V_{\text{gate}} = -50$  V. 改变该门电压与光照的协同处理时间  $t_d$ , 分别测得经光电协同处

理后的界面电阻  $R_n$  及其光照后的电阻. 研究发现: 经第二次光照后电阻都能从  $R_n$  恢复到  $R_0$ , 并且  $R_0$  基本不变; 而  $R_n$  随  $t_d$  的增加而增加, 结果如图 8 中内插图所示. 根据 (2) 式计算得的 PPC 值随  $t_d$  的变化结果如图 8 所示.

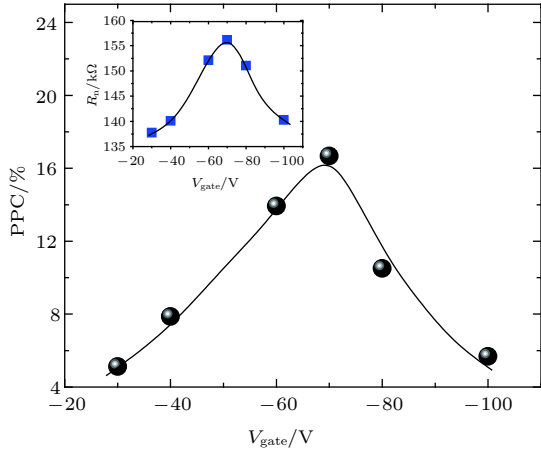


图 7 PPC 值随  $V_{gate}$  的变化, 其中内插图为  $R_n$  随  $V_{gate}$  的变化  
Fig. 7. Relationship between the PPC value and gate voltage ( $V_{gate}$ ). Inset is the dependence of  $R_n$  on  $V_{gate}$ .

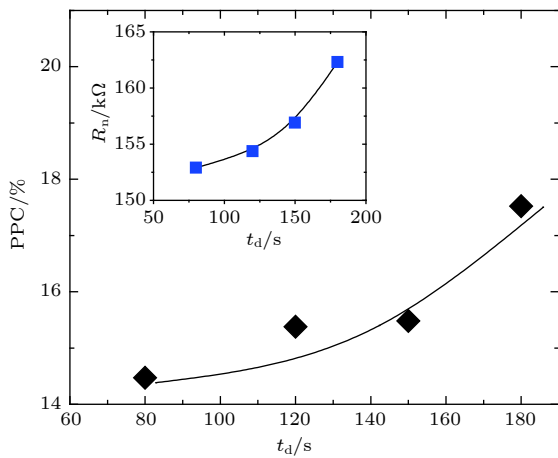


图 8 门电压的处理时间  $t_d$  对 PPC 值的影响关系, 插图为  $R_n$  随  $t_d$  的变化关系  
Fig. 8. The PPC value as a function of gating time  $t_d$ . Inset is the dependence of  $R_n$  on  $t_d$ .

从图 8 可以看出, 门电压和光照的协同处理时间越长, LAO/STO 异质结的 PPC 数值越大: 其大小从  $t_d$  为 80 s 的 14.5% 增加到  $t_d$  为 180 s 的 17.5%. 这是由于随着处理时间的延长, 氧空位在 STO 一侧的电极 6 处堆积也增多, 界面的载流子浓度也降低更多, 从而使  $R_n$  增大, 因此根据 (2) 式算得的 PPC 增大.

另外, 需要特别指出的是, 还研究了正的门电

压与光照的协同效应对 LAO/STO 的持续光电导效应的调控, 结果是未发现 LAO/STO 在正的电压影响下能出现明显的 PPC 效应. 其原因可能是正的电压对 LAO/STO 界面电阻态本身就调控不明显. 此外, 还探究了无光照影响的场效应即常规场效应, 对 LAO/STO 光电导效应的调控, 结果也是未发现这种场效应对光电导效应有明显影响. 这是因为常规的场效应与光电协同增强的场效应对 LAO/STO 界面电阻的影响机制有显著区别. 这也从另外一个角度说明本文所发现的 PPC 效应与光电协同效应对 LAO/STO 界面的独特作用机制有关.

## 4 结 论

本文研究了 LAO/STO 界面的光电导效应的场调控, 发现通过光电协同效应增强的场效应 (在一定的背栅门电压和光照的协同处理下) 可以显著地增强 LAO/STO 异质结界面的持续光电导效应. LAO/STO 的这种电场控制的持续光电导效应与该异质结中光电协同机制影响下的氧空位迁移有关. 基于 LAO/STO 界面中的这种光电输运性质, 可将 LAO/STO 开发成一种由电场控制的光电子记忆器件或光探测器件, 具有潜在的应用价值.

## 参考文献

- [1] Ohtomo A, Hwang H Y 2004 *Nature* **427** 423
- [2] Reyren N, Thiel S, Caviglia A D, Kourkoutis L F, Hammerl G, Richter C, Schneider C W, Kopp T, Ruetschi A S, Jaccard D, Gabay M, Muller D A, Triscone J M, Mannhart J 2007 *Science* **317** 1196
- [3] Richter C, Boschker H, Dietsche W, Fillis-Tsirakis E, Jany R, Loder F, Kourkoutis L F, Muller D A, Kirtley J R, Schneider C W, Mannhart J 2013 *Nature* **502** 528
- [4] Dikin D A, Mehta M, Bark C W, Folkman C M, Eom C B, Chandrasekhar V 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 056802
- [5] Caviglia A D, Gariglio S, Cancellieri C, Sacépé B, Fête A, Reyren N, Gabay M, Morpurgo A F, Triscone J M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 236802
- [6] Liu Z Q, Li C J, Lu W M, Huang X H, Huang Z, Zeng S W, Qiu X P, Huang L S, Annadi A, Chen J S, Coey J M D, Venkatesan T, Ariando 2013 *Phys. Rev. B* **87** 201102(R)
- [7] Herranz G, Basletić M, Bibes M, Carrétéro C, Tafrá E, Jacquet E, Bouzheouane K, Deranlot C, Hamzić A, Broto J M, Barthélémy A, Fert A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 216803
- [8] Kalabukhov A, Gunnarsson R, Börjesson J, Olsson E, Claesson T, Winkler D 2007 *Phys. Rev. B* **75** 121404
- [9] Siemons W, Koster G, Yamamoto H, Harrison W A, Lucovsky G, Geballe T H, Blank D H A, Beasley M R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 196802

- [10] Zhang H R, Zhang Y, Zhang H, Zhang J, Shen X, Guan X X, Chen Y Z, Yu R C, Pryds N, Chen Y S, Shen B G, Sun J R 2017 *Phys. Rev. B* **96** 195167
- [11] Guduru V K, Granados del Aguila A, Wenderich S, Kruize M K, McCollam A, Christianen P C M, Zeitler U, Brinkman A, Rijnders G, Hilgenkamp H, Maan J C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 051604
- [12] Lu H L, Liao Z M, Zhang L, Yuan W T, Wang Y, Ma X M, Yu D P 2013 *Sci. Rep.* **3** 2870
- [13] Tarun M C, Selim F A, McCluskey M D 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 187403
- [14] Tebano A, Fabbri E, Pergolesi D, Balestrino G, Traversa E 2012 *ACS Nano* **6** 1278
- [15] Ristic Z, di Capua R, Chiarella F, de Luca G M, Maggio-Aprile I, Radovic M, Salluzzo M 2012 *Phys. Rev. B* **86** 045127
- [16] Rastogi A, Pulikkotil J J, Budhani R C 2014 *Phys. Rev. B* **89** 125127
- [17] Jin K X, Lin W, Luo B C, Wu T 2012 *Sci. Rep.* **5** 8778
- [18] Lei Y, Li Y, Chen Y Z, Xie Y W, Chen Y S, Wang S H, Wang J, Shen B G, Pryds N, Hwang H Y, Sun J R 2014 *Nat. Commun.* **5** 5554
- [19] Ravikumar V, Wolf D, Dravid V P 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 960
- [20] Haeni J H, Irvin P, Chang W, Uecker R, Reiche P, Li Y L, Choudhury S, Tian W, Hawley M E, Craigo B, Tagantsev A K, Pan X Q, Streiffer S K, Chen L Q, Kirchoefer S W, Levy J, Schlom D G 2004 *Nature* **430** 758



# Light-enhanced gating effect on the persistent photoconductivity at LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface\*

Dao Liu-Yun<sup>1)</sup> Zhang Zi-Tao<sup>1)</sup> Xiao Yu-Tong<sup>1)</sup> Zhang Ming-Hao<sup>1)</sup> Wang Shuai<sup>1)</sup>  
He Jun<sup>2)</sup> Jia Jin-Shan<sup>1)</sup> Yu Le-Jun<sup>2)</sup> Sun Bo<sup>2)</sup> Xiong Chang-Min<sup>1)†</sup>

1) (*Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

( Received 14 December 2018; revised manuscript received 20 January 2019 )

## Abstract

The LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface has been one of the topics studied most during the past few years due to its many intriguing properties such as the two-dimensional electron gas, transient photoconductivity (PC), persistent photoconductivity (PPC), and the coexistence of the PC and PPC. Of them, the PPC effect is the most interesting because of its potential application in exploring the photoelectric memory devices. Until now, tuning of the PPC of the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface under the external stimuli, such as electric or magnetic field is less addressed, while the relevant knowledge is of great value for exploring the memory devices with multifunctionality. In this paper, we report on an electric field control of the persistent PPC at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface. Our LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterojunction is fabricated by growing the LaAlO<sub>3</sub> film on the SrTiO<sub>3</sub> substrates through using pulsed laser deposition. The substrate temperature is kept at 750 °C and the partial pressure of oxygen is maintained at  $3.3 \times 10^{-5}$  Torr (1 Torr =  $1.33322 \times 10^2$  Pa) during the deposition. The thickness of LaAlO<sub>3</sub> film is controlled to be about 2 nm by setting an appropriate deposition time. The X-ray diffraction experiment confirms that the LAO film is well epitaxial and of single phase. To guarantee the good electric contacts, Al electrodes are soldered at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface and the back side of the SrTiO<sub>3</sub> respectively by ultrasonic welding. We find that the PPC at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface can be significantly reinforced and modulated by the light-enhanced gating effects: that is, after a negative back gate voltage processing combined with a simultaneous light illumination, the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface can exhibit a notable PPC effect. And the PPC effect increases as the negative gate voltage increases, and then attains a maximum at a back gate voltage of about -70 V. Further increase of the negative gate voltage can cause the PPC to decrease. Additionally, the PPC is also found to increase monotonically with increasing the gating time. The present result can be understood in terms of the migration of the oxygen vacancies under the influence of photoelectric synergetic effect. This field enhanced PPC effects at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface may find their applications in designing the photoelectric memory devices with electric tunability.

**Keywords:** LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interface, persistent photoconductivity, illumination, gating effect

**PACS:** 73.40.-c, 77.84.Cg, 72.40.+w

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182204

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFB0405101) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11474024).

† Corresponding author. E-mail: [cmxiong@bnu.edu.cn](mailto:cmxiong@bnu.edu.cn)