

УДК 537.312.51:537.312.52:537.312.53:537.312.6

ОСОБЕННОСТИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$

© 2020 г. А. В. Леонтьев¹, *, Д. К. Жарков¹, Д. П. Павлов¹, Р. Ф. Мамин¹

¹Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Федеральный исследовательский центр
“Казанский научный центр Российской академии наук”, Казань, Россия

*E-mail: Andrey.V.Leontyev@gmail.com

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 26.08.2020 г.

Исследовано влияние облучения серий ультракоротких лазерных импульсов с длиной волны 514 и 257 нм на электрическое сопротивление гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$. В диапазоне температур 80–200 К облучение вызывает обратимое увеличение сопротивления структуры. Характерное время скорости изменения сопротивления составляет около 10 с.

DOI: 10.31857/S0367676520120248

ВВЕДЕНИЕ

С 2004 г., когда было обнаружено, что в системе с интерфейсом между двумя немагнитными широкозонными оксидами $LaAlO_3$ (LAO) и $SrTiO_3$ (STO) возникает слой электронного газа (металлическая фаза) с высокой подвижностью [1], подобным гетероинтерфейсам было посвящено множество работ (см., например, [1–9]). В частности, было продемонстрировано, что на границе раздела LAO/STO образуется металлическая фаза, или квазидвумерный электронный газ (q2DEG), при условии, что число слоев LAO выше трех [2, 3]. Показано, что такая система претерпевает переход в сверхпроводящее состояние при 300 мК [4]. Был сделан вывод, что основным механизмом формирования q2DEG служит электронная перестройка с последующей структурной перестройкой. Позднее q2DEG был обнаружен в структурах, образованных и другими немагнитными диэлектриками. Общим для всех них является то, что возникновение q2DEG связано либо с полярной природой одного из компонентов, либо с дефектами или легирующими примесями. Показано, что q2DEG может образовываться на границе между неполярными оксидами, один из которых является сегнетоэлектриком [3, 4]. Основным преимуществом использования сегнетоэлектриков является возможность переключать поляризацию внешним воздействием и, таким образом, управлять свойствами электронной системы.

Двумерный электронный газ, формирующийся на интерфейсе гетероструктур, в основе которых лежит оксид титаната стронция, предоставляет обширную платформу для формирования

элементарной базы новых электронных устройств [1]. Их уникальные свойства, такие как сверхпроводимость, высокая подвижность носителей заряда и чувствительность к воздействию оптического излучения, представляют значительный интерес для исследований [2–4]. Анализ откликов среды на оптическое воздействие широко используется при исследовании наноматериалов и гетероструктур [10–13].

Наиболее распространенным механизмом описания явлений образования q2DEG является модель поляризационной катастрофы [1, 9]. Важной особенностью, влияющей на образование q2DEG, является локальная поляризация слоев внутри LAO. Для наших исследований были выбраны гетероструктуры типа $BaTiO_3/LaMnO_3$ (ВТО/ЛМО), в которых все слои электрически нейтральны, но возникает сегнетоэлектрическая поляризация из-за смещения позиции атомов Ti относительно центра элементарной ячейки в слое ВТО. Направление такой поляризации может переключаться внешним электрическим полем. На основе расчетов зонной структуры из первых принципов, была продемонстрирована возможность образования q2DEG на границе раздела, состоящей из перовскитного сегнетоэлектрика ВТО и антиферромагнитного манганита ЛМО. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты измерений удельного и фотоиндуцированного сопротивления гетероструктуры ВСТО/ЛМО.

Отдельным важным моментом в подобных гетероструктурах является вопрос увеличения количества носителей заряда. Этого можно добиться интенсивным оптическим облучением [6, 14]. При воздействии света происходит поглощение

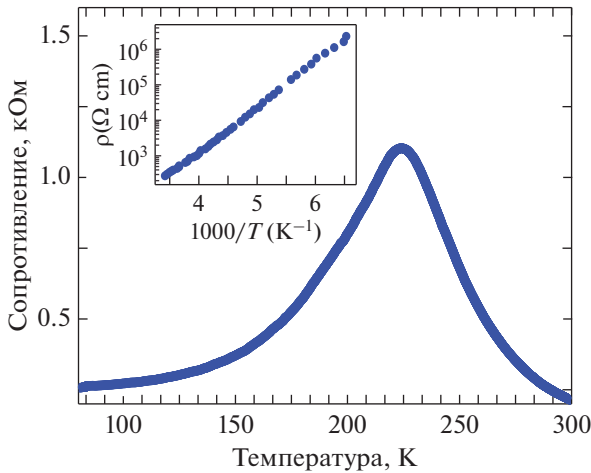


Рис. 1. Температурная зависимость темнового сопротивления образца BSTO/LMO. Зависимость сопротивления монокристалла LMO от температуры показана на врезке.

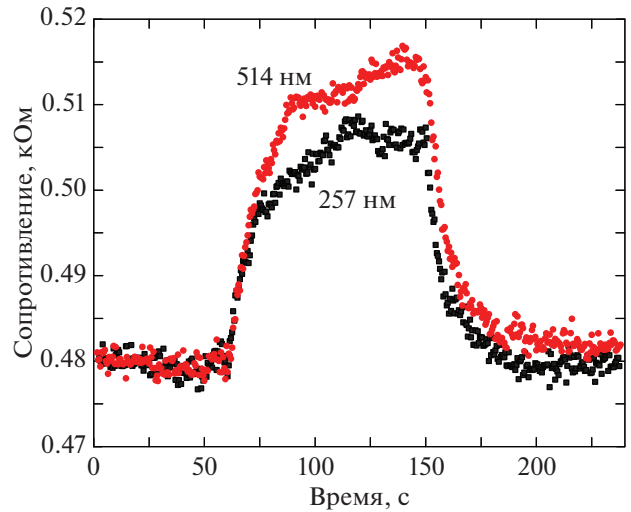


Рис. 2. Динамика изменения сопротивления образца BSTO/LMO после включения и выключения освещения на длинах волн 514 и 257 нм. Темновые периоды заштрихован. Температура образца – 100 К.

фотонов вблизи раздела двух диэлектриков. В результате за счет поглощенной энергии электроны могут перейти из валентной зоны в зону проводимости, и пополнить резервуар свободных носителей заряда в области гетероинтерфейса. Подобные процессы могут быть использованы при создании энергонезависимых устройств памяти [7, 8].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Монокристалл LMO был выращен методом бестигельной зонной плавки с радиационным нагревом. Затем из него поперек оси c были вырезаны плоские образцы. Таким образом, ось c монокристаллических образцов LMO была направлена поперек плоской ab -поверхности.

После этого на обработанные ab -поверхности монокристаллов LMO методом магнетронного распыления были нанесены эпитаксиальные пленки $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ (BSTO) [15, 16] при 650°C . Выбор этих объектов в первую очередь обуславливался хорошо разработанными технологиями приготовления каждого из компонентов [15]. Пленки BSTO с содержанием Sr, равным 0.2, достаточно слабо отличаются от пленок ВТО, температура сегнетоэлектрического перехода T_c составляет ~ 540 К [15] для пленки толщиной 300 нм. Мы используем пленки толщиной 400 нм, полагая, что, начиная с определенной толщины, части системы, обладающей полярными свойствами, параметры q2DEG не будут значительно изменяться.

Сопротивление интерфейса измерялось с помощью стандартного четырехконтактного метода. Образец был помещен в гелиевый криостат Janis ST-100 с контроллером LakeShore 325. Температура образцов измерялась медно-константановой тер-

мопарой и поддерживалась с точностью ± 0.1 К в течение всех измерений. Поверхность образца между нанесенными при помощи серебряной пасты электродами освещалась лазерным пучком с гауссовым профилем диаметром 4 мм. Длительность лазерных импульсов составляла 200 фс, энергия – 6 мкДж, длина волны 514 или 257 нм, частота следования импульсов – 3 кГц. Ультрафиолетовое излучение (257 нм) поглощается главным образом на поверхности слоя BSTO, а видимое (514 нм) может проникать сквозь BSTO и поглощаться вблизи гетероинтерфейса [17].

Темновая температурная зависимость электросопротивления гетероструктуры $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ показана на рис. 1. Сопротивление гетероструктуры уменьшается с понижением температуры, демонстрируя металлическое поведение ниже определенной температуры. При этом температурная зависимость сопротивления монокристалла LaMnO_3 характерно полупроводниковая (см. врезку на рис. 1).

При низких ($T < 210$ К) температурах при включении освещения сопротивление образца начинает возрастать с характерным временем около 10 с, несмотря на ожидаемое увеличение концентрации фотоиндуцированных носителей в области гетероинтерфейса при облучении видимым (и ультрафиолетовым) светом. Выключение света приводит к возвращению системы в темновое состояние с приблизительно тем же характерным временем. Эффект фотоиндуцированного электросопротивления наблюдается при освещении как зеленым (514 нм) светом, так и ультрафиолетовым (257 нм) излучением, но для зеленого света эффект выражен сильнее (рис. 2).

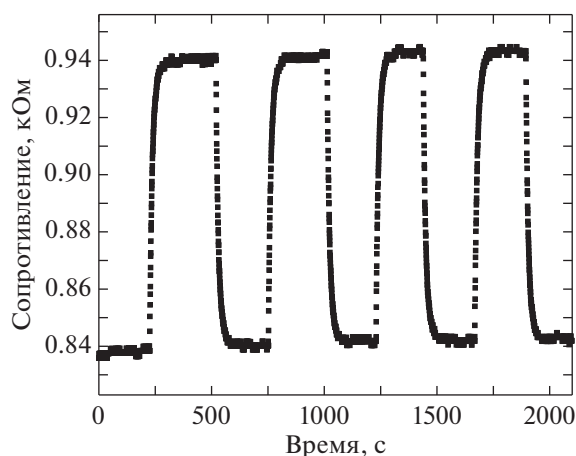


Рис. 3. Многократное переключение электросопротивления образца BSTO/LMO освещением на длине волны 514 нм. Темновые периоды заштрихованы. Температура образца — 200 К.

На рис. 3 показаны несколько циклов переключения между световым и темновым состояниями, восстановление сопротивления происходит полностью. Поскольку в экспериментах используется низкая частота повторения лазерных импульсов (3 кГц), наблюдаемый эффект не может объясняться прямым нагревом образца лазерными импульсами [18].

Мы можем предложить следующее возможное объяснение такого поведения. Так как мы наблюдаем довольно медленные процессы релаксации, то следует предположить, что динамика этих зарядов связана с релаксацией в области сегнетоэлектрической пленки (поскольку процессы релаксации в области с металлическим поведением должны были бы быть чрезвычайно быстрыми). При облучении поверхности светом носители будут двигаться во внутреннем электрическом поле сегнетоэлектрической пленки, и при этом возможны процессы, приводящие к опустошению области гетероинтерфейса. Чтобы определить конкретные механизмы переноса носителей необходимы дальнейшие эксперименты, связанные с переключением поляризации пленки в сильных электрических полях.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00260).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohtomo A., Hwang H.Y. // Nature. 2004. V. 427. P. 423.
2. Thiel S., Hammerl G., Schmehl A. et al. // Science. 2006. V. 313. P. 1942.
3. Niranjana M.K., Wang Y., Jaswal S.S., Tsymbal E.Y. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. Art. № 016804.
4. Reyren N., Thiel S., Caviglia A.D. et al. // Science. 2007. V. 317. P. 1196.
5. Brinkman A., Huijben M., Van Zalk M. et al. // Nat. Mater. 2007. V. 6. P. 493.
6. Kalabukhov A., Gunnarsson R., Borjesson J. et al. // Phys. Rev. B 2007. V. 75. Art. № 121404.
7. Moetakef P., Cain T.A., Ouellette D.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. Art. № 232116.
8. Jackson C.A., Stemmer S. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. Art. № 180403.
9. Hohenberg P., Kohn W. // Phys. Rev. 1964. V. 136. Art. № B864.
10. Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С., Самарцев В.В. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 75. № 2. С. 187; Ivanin K.V., Leontev A.V., Lobkov V.S., Samartsev V.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. № 2. P. 172.
11. Иванин К.В., Леонтьев А.В., Лобков В.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 76. № 3. С. 333; Ivanin K.V., Leontev A.V., Lobkov V.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2012. V. 76. № 3. P. 290.
12. Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1620; Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 11. P. 1478.
13. Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 12. С. 1581; Karimullin K.R., Naumov A.V., Arzhanov A.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 12. P. 1396.
14. Жарков Д.К., Леонтьев А.В., Павлов Д.П., Мамин Р.Ф. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1633; Zharkov D.K., Leontyev A.V., Pavlov D.P., Mamin R.F. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 12. P. 1473.
15. Павлов Д.П., Пианзина И.И., Мухортов В.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 7. С. 440; Pavlov D.P., Piyanzina I.I., Muhortov V.I. et al. // JETP Lett. 2017. V. 106. P. 460.
16. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtzov A.N. // Ferroelectrics. 2000. V. 247. P. 75.
17. Mamin R.F., Zharkov D.K., Pavlov D.P., Kabanov V.V. // Ferroelectrics. 2019. V. 541. P. 93.
18. Liu S.W., Xu J., Guzun D. et al. // Appl. Phys. B. 2006. V. 82. P. 443.