

УДК 537.9:537.6:53.06

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$

© 2023 г. Д. П. Павлов<sup>1</sup>, \*, А. О. Чибирев<sup>1</sup>, Т. М. Салихов<sup>1</sup>, Р. Ф. Мамин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский 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: dmitry.p.pavlov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2023 г.

Исследовано температурное поведение сопротивления гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ . В температурном диапазоне 120–180 К обнаружена аномальная область с двумя максимумами сопротивления, а ниже 120 К – переход к металлическому характеру проводимости. Показано, что сопротивление гетероструктуры под воздействием зеленого света существенно увеличивается.

DOI: 10.31857/S0367676523702289, EDN: XBGJKH

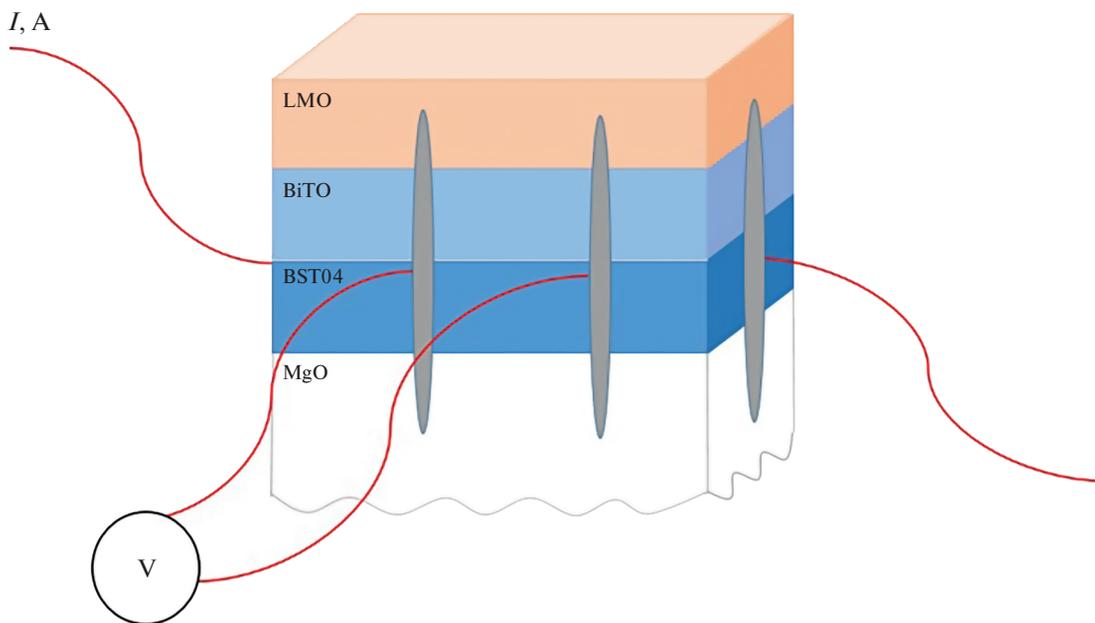
### ВВЕДЕНИЕ

Использование оксидов сложного состава и гетероструктур на их основе неизменно приводит к прогрессу в разработке современных электронных устройств и новых технологий. При развитии технологий для оптических приложений особо интересны оксиды редкоземельных элементов [1–4]. Они широко используются в квантовых компьютерах [2] и в качестве детекторов, датчиков и других устройств [3], а также применяются в радиационных и энергетических устройствах [4]. Создание сложных гетероструктур может привести к совершенно новым функциональным свойствам, а характеристики гетероструктурного материала могут существенно изменяться при воздействии на одну из его частей. Одним из таких примеров является гетероструктура, состоящая из двух непроводящих оксидов  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) и  $\text{SrTiO}_3$  (STO) исследованные Охтомо и Вангом в 2004 г. [5], в которой образуется двумерный электронный газ (2DEG) высокой подвижностью носителей на интерфейсе (здесь и далее под интерфейсом будем понимать переходную область вблизи границы раздела между двумя диэлектриками, в которой образуется повышенная концентрация носителей заряда). За последние два десятилетия подобные гетероструктуры активно изучались [5–13]. Было обнаружено, что гетероструктуры LAO/STO обладают ферромагнитными [6] и сверхпроводящими свойствами [7, 8, 10], причем сверхпроводящее состояние наблюдается ниже 300 мК. Позднее сверхпроводящее поведение было обнаружено при температурах до

30 К в гетероструктурах  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$  [14]. Впоследствии 2DEG наблюдался в гетероструктурах  $\text{NdAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{PrAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{NdGaO}_3/\text{SrTiO}_3$ , а также в  $\text{LaGaO}_3/\text{SrTiO}_3$ .

Необходимым фактором для возникновения 2DEG является полярность одного из компонентов гетероструктуры. На границе раздела диэлектрических оксидов, один из которых является сегнетоэлектриком, также может наблюдаться состояние с высокой проводимостью [15, 16]. Было обнаружено состояние с высокой проводимостью, характерной для металлов, на интерфейсе в гетероструктуре  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ , когда ось с поляризации сегнетоэлектрической пленки  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  направлена перпендикулярно плоскости границы раздела, при температурах ниже 160 К [17]. Такое состояние связано с повышением концентрации носителей в области  $\text{LaMnO}_3$  в тонком слое (2–10 нм) вблизи границы с сегнетоэлектриком вследствие экранирования поляризации сегнетоэлектрика.

Эффект отрицательной фотопроводимости наблюдается в различных системах [18–20], однако обычно это эффект, проявляющийся в однородном по составу образце. Иная ситуация возникает в многокомпонентной системе, в нашем случае – в гетероструктуре. В этом случае воздействие света на один из компонентов системы может привести к существенному изменению проводящих свойств в другой части системы. Примером такой многокомпонентной системы может служить исследуемая гетероструктура сег-



**Рис. 1.** Схема измерения сопротивления гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  четырехконтактным методом.

гнетозлектрик/диэлектрик с металлической проводимостью на интерфейсе, что перспективно для разработки сегнетоэлектрических полевых транзисторов [17, 21]. В гетероструктурах  $\text{EuO}/\text{KTaO}_3$  была обнаружена перестраиваемая электрическим полем двумерная сверхпроводимость [22], что расширяет разнообразие свойств транзисторов.

В данной работе исследуются проводящие свойства гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  с толщиной слоя  $\text{LaMnO}_3$  равной 600 нм (LMO/BiTO/BST0/MgO), состоящей из пленок  $\text{LaMnO}_3$  (LMO),  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  (BiTO) и  $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$  (BSTO) последовательно нанесенных на подложку MgO, и влияние освещения на проводимость такой гетероструктуры. Выявлено существование слоя с высокой проводимостью носителей заряда и аномальным поведением температурной зависимости электросопротивления  $R(T)$  в гетероструктуре LMO/BiTO/BST0/MgO. Представлены временные зависимости фотосопротивления гетероструктуры при различных температурах.

## ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

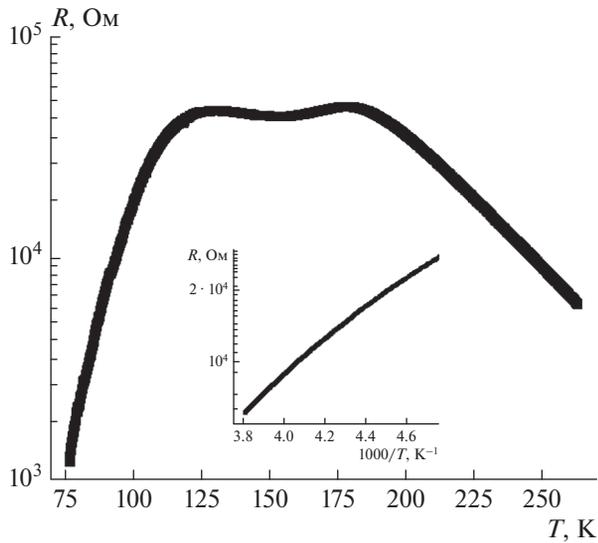
Гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  создавались на монокристаллических подложках MgO (100). На поверхность монокристаллов MgO в ориентации (100) методом высокочастотного магнетронного распыления вначале был нанесен промежуточный слой пленки  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  толщиной 4 нм, для

получения качественных эпитаксиальных слоев последующих пленок. На поверхность  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  была нанесена пленка  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  толщиной 300 нм, и затем на  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  нанесена пленка  $\text{LaMnO}_3$  различной толщины от 50 до 600 нм. На гетероструктуре с толщиной пленки  $\text{LaMnO}_3$  600 нм были получены наиболее интересные результаты, которые приведены в данной работе.

Транспортные свойства образцов были исследованы четырехзондовым методом в температурном диапазоне 77–300 К. Контакты были созданы с помощью токопроводящего клея на боковой поверхности образцов так, чтобы они контактировали с интерфейсом гетероструктуры (рис. 1). Измерения проводились на постоянном токе. Для исследования фотосопротивления применялся оптический криостат фирмы Janice с модулем термостатирования Cernox. В качестве источника света был использован твердотельный лазер с длиной волны 512 нм и мощностью 15 мВт. Облучение проводилось в непрерывном режиме. Длительность воздействия была постоянной.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена температурная зависимость электросопротивления  $R(T)$  гетероструктуры LMO/BiTO/BST0/MgO. При температурах выше 180 К наблюдается характерный для полупроводников активационный режим  $R(T)$ , при температурах ниже 180 К и приблизительно до 120 К существует аномальная область с

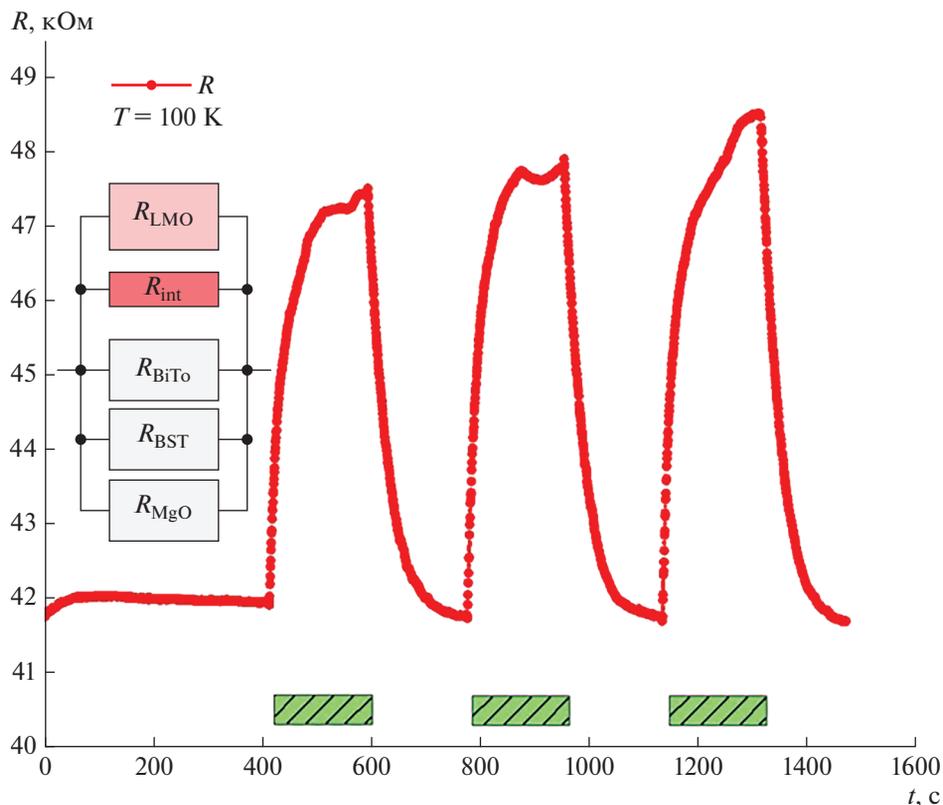


**Рис. 2.** Температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  с толщиной слоя LMO 600 нм.

двумя максимумами сопротивления, и, наконец, при температурах ниже 120 К происходит резкое уменьшение сопротивление с температурой вплоть до значений порядка 1000 Ом. Глобаль-

ный максимум сопротивления составляет приблизительно 56 кОм вблизи температуры 180 К.

На следующем этапе было исследовано влияние монохроматического света на транспортные свойства гетероструктуры LMO/BiTO/BST0/MgO. Идея заключалась в том, что если причины возникновения области аномальной проводимости в исследуемой гетероструктуре заключаются в локальном увеличении концентрации носителей заряда в некотором тонком приграничном слое, то прямое или косвенное влияние света определенной частоты на носители заряда может отразиться на величине электрического сопротивления всей гетероструктуры. Для этого было измерено сопротивление гетероструктуры при воздействии света и без воздействия света. На рис. 3 представлена временная зависимость электросопротивления гетероструктуры LMO/BiTO/BST0/MgO при температуре 100 К. Во время включения освещения наблюдалось увеличение сопротивления примерно на 15%. В момент выключения освещения сопротивление восстанавливало свое прежнее значение. На рисунке представлено три таких интервала периодического воздействия света. По характеру линии видно, что в этом случае 180 секундное воздействие лазерным светом приводило к насыщению увеличения сопротивления гетероструктуры.



**Рис. 3.** Временная зависимость фотосопротивления гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  (600 нм) при температуре 100 К. На вставке изображена схема гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ . Заштрихованные прямоугольники длиной 180 с показывают временные интервалы воздействия света.

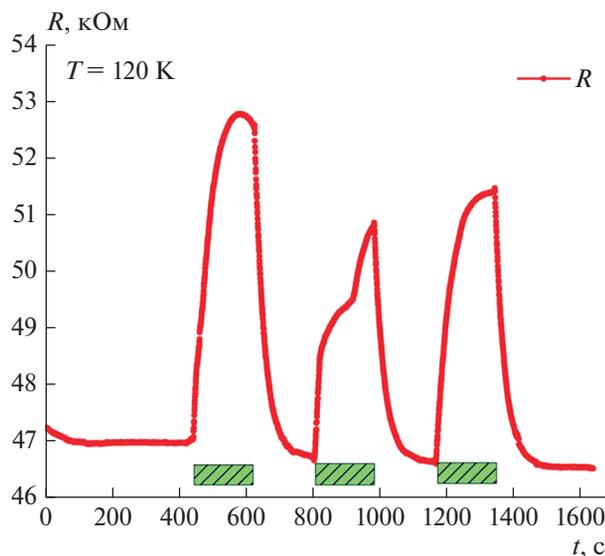


Рис. 4. Временная зависимость фотосопротивления гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  (600 нм) при температуре 120 К. Заштрихованные прямоугольники длиной 180 с показывают временные интервалы воздействия света.

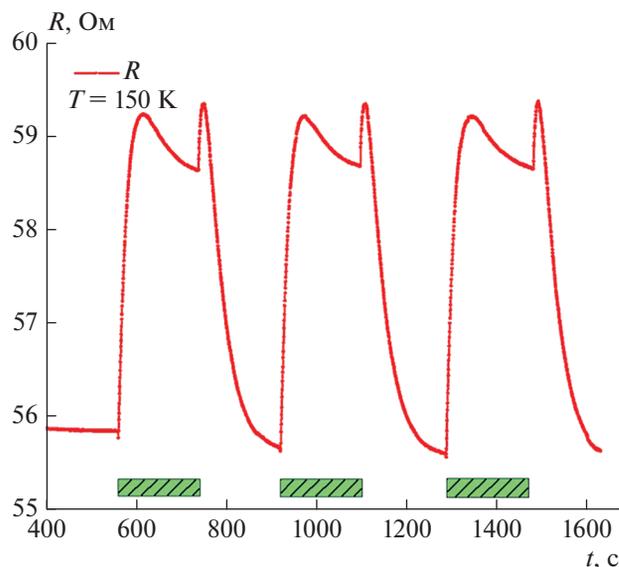


Рис. 5. Временная зависимость фотосопротивления гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  (600 нм) при температуре 150 К. Заштрихованные прямоугольники длиной 180 с показывают временные интервалы воздействия света.

На рис. 4 представлена временная зависимость электросопротивления гетероструктуры LMO/BiTO/BSTO/MgO при температуре 120 К. В этом случае в моменты включения освещения также, как и в предыдущих случаях, наблюдалось увеличение сопротивления примерно на 10%. В момент выключения освещения сопротивление восстанавливало свое прежнее значение. На рисунке представлено три интервала с максимумами на разных уровнях. Возможно, это связано с тем, что вблизи максимума температурного изменения сопротивления конкурируют вклады токов различных частей гетероструктуры.

На рис. 5 представлена временная зависимость электросопротивления гетероструктуры LMO/BiTO/BSTO/MgO при температуре 150 К. В этом случае в моменты включения освещения происходило увеличение сопротивления от 56 до 59 кОм. В момент выключения освещения сопротивление восстанавливало свое прежнее значение. На рис. 5 представлено три интервала воздействия света, в течение каждого интервала фотовоздействия, наблюдалось два максимума электросопротивления.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследуемой гетероструктуре может существовать несколько каналов проводимости (см. вставку на рис. 3), а именно область нижнего сегнетоэлектрического подслоя BSTO, в которой ток чрезвычайно мал, область верхнего сегнетоэлектрического слоя BiTO, через который ток также мал и область слоя полупроводника LMO,

сопротивление которой характеризуется активационным законом  $R(T)$ . Также существует канал проводимости в области интерфейса BiTO и LMO. Поскольку в эксперименте наблюдается уменьшение сопротивления с температурой, характерное для металлов, то единственной возможной областью, где может наблюдаться такое состояние, является область в слое LMO вблизи интерфейса с сегнетоэлектрической пленкой BiTO.

В предыдущих работах [14, 17] было показано существование областей вблизи интерфейса BSTO/LMO, демонстрирующих аномальное поведение  $R(T)$  и это было связано с реализацией сценария, когда поляризация сегнетоэлектрика на границе раздела экранировалась за счет перестройки электронной структуры в LMO. Вследствие чего в слое LMO, вблизи границы раздела, возникала повышенная концентрация носителей заряда. Мы полагаем, что подобный сценарий реализуется и в исследуемой гетероструктуре. В данном случае за возникновение проводящего слоя ответственен сегнетоэлектрик  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ . Были сделаны оценки энергии активации в высокотемпературной “активационная” области части  $R(T)$  (см. вставку на рис. 2), которая составила 0.28 эВ.

С учетом малой мощности лазерного излучения, использованного в настоящей работе (0.15 Вт), и большой величиной изменения сопротивления при воздействии света (которые составляют 5–16 кОм), можно не рассматривать влияние нагрева. Кроме того, при 120 и 150 К очень мало температурное изменение сопротивления. Основная причина увеличения сопротивления гетероструктуры под воздей-

ствием света, по нашему мнению, заключается в дополнительном внутреннем экранировании поляризации сегнетоэлектрика носителями, возбужденными светом. В результате эффективная поляризация уменьшается, и пропорционально уменьшается число носителей в слое LMO, обусловленное внешним экранированием поляризации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано температурное поведение сопротивления и влияние освещения зеленым светом на сопротивление при определенных температурах для гетероструктуры  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  с толщиной слоя  $\text{LaMnO}_3$  равной 600 нм. В данной гетероструктуре выше 180 К наблюдается активационный режим с энергией активации 0.28 эВ, в диапазоне температур 120–180 К существует аномальная область с двумя максимумами сопротивления, и при температурах ниже 120 К происходит стремительное уменьшение сопротивления вплоть до значений порядка 1000 Ом. При этом максимальное значение сопротивления составляет приблизительно 56 кОм. Особенности проводимости при низких температурах связываются нами с перестройкой электронной подсистемы вблизи области интерфейса вследствие влияния поляризации сегнетоэлектрической пленки, что приводит к увеличению концентрации свободных носителей на интерфейсе. Также, в гетероструктуре наблюдается эффект аномальной фотопроводимости, который заключается в увеличении электрического сопротивления образца под действием света. Предложено объяснение эффекта увеличения сопротивления под воздействием света, которое связывает наблюдаемый эффект с уменьшением влияния на интерфейс поляризации сегнетоэлектрической пленки вследствие частичного экранирования поляризации свободными носителями, возбужденными светом.

Исследование проводимости гетероструктур выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00179). Исследование динамики фотосопротивления гетероструктур при включении и выключении

освещения выполнено в рамках темы государственного задания КФТИ им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hossain M.K., Hossain S., Ahmed M.H. et al. // ACS Appl. Electron. Mater. 2021. V. 3. P. 3715.
2. Thiel C.W., Macfarlane R.M., Sun Y. et al. // Laser Phys. 2014. V. 24. Art. No. 106002.
3. Hossain M.K., Ahmed M.H., Khan I. et al. // ACS Appl. Electron. Mater. 2021. V. 3. P. 4255.
4. Hossain M.K., Raihan G.A., Akbar A. et al. // ACS Appl. Electron. Mater. 2022. V. 4. P. 3327.
5. Ohtomo A., Hwang H.Y. // Nature. 2004. V. 427. P. 423.
6. Thiel S., Hammerl G., Schmehl A. et al. // Science. 2006. V. 313. P. 1942.
7. Reyren N., Thiel S., Cavaglia A.D. et al. // Science. 2007. V. 317. P. 1196.
8. Li D., Gariglio S., Cancellieri C. et al. // APL Mater. 2014. V. 2. Art. No. 012102.
9. Pavlenko N., Kopp T., Tsybmal E. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. Art. No. 064431.
10. Pavlenko N., Kopp T., Tsybmal E. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. Art. No. 020407.
11. Pavlenko N., Kopp T., Mannhart J. et al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. Art. No. 201104.
12. Lechermann F., Boehnke L., Grieger D. et al. // Phys. Rev. B. 2014. V. 90. Art. No. 085125.
13. Salluzzo M., Gariglio S., Stornaiuolo D. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. Art. No. 087204.
14. Pavlov D.P., Zagidullin R.R., Mukhortov V.M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 237001.
15. Niranjana M., Wang Y., Jaswal S.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. Art. No. 016804.
16. Niranjana M.K., Burton J.D., Velev J.P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. Art. No. 052501.
17. Павлов Д.П., Пилянзина И.И., Мухортков В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 7. С. 440.
18. Tailor N.K., Maity P., Satapathi S. // ACS Photon. 2021. V. 8. P. 2473.
19. Gustafson J.K., Wines D., Gulian E. et al. // J. Phys. Chem. C. 2021. V. 125. P. 8712.
20. Grillo A., Faella E., Pelella A. et al. // Adv. Funct. Mater. 2021. V. 31. Art. No. 2105722.
21. Pavlenko M.A., Tikhonov Y.A., Razumnaya A.G. et al. // Nanomaterials. 2021. V. 12. P. 75.
22. Hua X., Meng F., Huang Z. et al. // NPJ Quantum Mater. 2022. V. 7. P. 1.

## Investigation of the resistance behavior of $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$ film heterostructures

D. P. Pavlov<sup>a, \*</sup>, A. O. Chibirev<sup>a</sup>, T. M. Salikhov<sup>a</sup>, R. F. Mamin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Centre Kazan Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029 Russia

\*e-mail: dmitry.p.pavlov@mail.ru

The temperature behavior of the  $\text{LaMnO}_3/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3/\text{MgO}$  heterostructure resistance was studied. Within the temperature range of 120–180 K, an anomalous region with two resistance maxima was found. Below 120 K, a transition to a metallic character of conductivity occurs. It was revealed the significant increase of the heterostructure resistance under the influence the green light radiation.