

УДК 537.312.6

## ПРОВОДИМОСТЬ ПЛЕНОЧНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$

© 2023 г. А. О. Чибирев<sup>1</sup>, \*, А. В. Леонтьев<sup>1</sup>, М. И. Банников<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: chibirev12@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Исследовано температурное поведение электрического сопротивления пленочных гетероструктур  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  на подложке MgO. Показано, что сопротивление значительно уменьшается с температурой ниже температуры максимума около 170 К. Такое поведение можно связать с переходом интерфейса в высокопроводящее состояние, так как подобное поведение очень похоже на то, что наблюдалось в гетероструктуре  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  на подложке монокристалла  $\text{LaMnO}_3$ .

DOI: 10.31857/S0367676522700958, EDN: NOXLYH

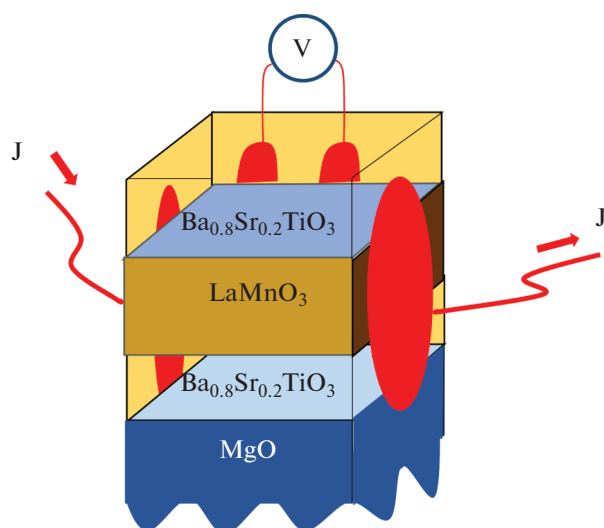
### ВВЕДЕНИЕ

Новые уникальные свойства функциональных материалов можно получить за счет эффектов, связанных с воздействием на одну из частей сложной гетероструктуры. Примером таких новых структур служат оксидные гетероструктуры с двумя непроводящими оксидами, обладающие уникальными транспортными свойствами в области интерфейса. Впервые двумерный электронный газ (2DEG) высокой подвижности на интерфейсе между двумя непроводящими оксидами  $\text{LaAlO}_3$  (LAO) и  $\text{SrTiO}_3$  (STO) был обнаружен Охтомо и Вангом в 2004 г. [1]. После этого к исследованиям гетероинтерфейсов на основе двух непроводящих оксидов было приковано особое внимание [1–7], т.к. это открывает новые возможности миниатюризации размеров электронных устройств. Установлено, что квазиметаллическая фаза образуется в слоях STO на границе  $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  (LAO/STO), когда количество слоев LAO больше трех [2, 3]. Также было показано, что гетероструктура LAO/STO обладает ферромагнитными свойствами [3] и переходит в сверхпроводящее состояние при температурах ниже 0.3 К [4]. При исследовании гетероструктуры  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{La}_2\text{CuO}_4$ , было обнаружено сверхпроводящее поведение на интерфейсе с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 30 К [8]. Позже 2DEG был обнаружен в других немагнитных диэлектриках. Установлено, что создание 2DEG происходит из-за полярной

природы одного из компонентов гетероструктуры. Поэтому 2DEG также образуется на границе раздела диэлектрических оксидов, один из которых является сегнетоэлектриком [8–10]. Основным преимуществом использования сегнетоэлектриков является возможность переключать направление поляризации с направления, перпендикулярного границе раздела, на направление вдоль границы и тем самым управлять свойствами электронной системы. Ранее нами было обнаружено высокопроводящее состояние на интерфейсе в гетероструктуре на основе сегнетоэлектрика и диэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ , когда в качестве подложки использовался монокристалл  $\text{LaMnO}_3$  [9]. В настоящей работе мы исследовали проводящие свойства гетероструктуры в пленочном исполнении  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  на подложке MgO.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Гетероструктуры получены при последовательном нанесении пленок сегнетоэлектрика  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$  (BSTO) и манганита  $\text{LaMnO}_3$  (LMO) на подложку MgO. Эпитаксиальные пленки BSTO и LMO наносили последовательно при распылении стехиометрических мишеней соответствующих составов методом высокочастотного магнетронного распыления при 650°C на подложку MgO толщиной 1 мм в ориентации (100). Была исследована температур-



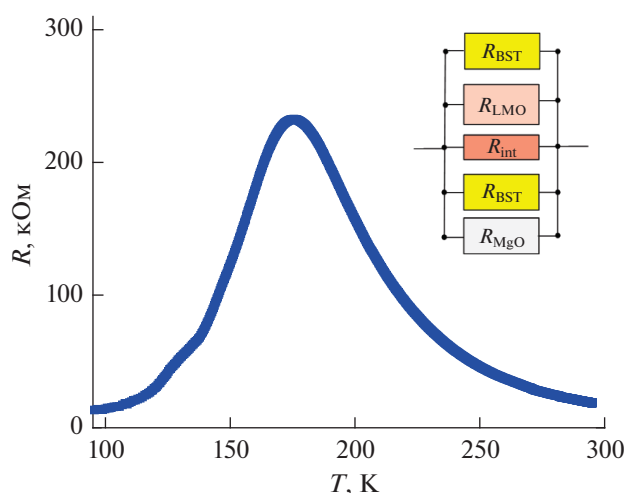
**Рис. 1.** Схематическое изображение гетероструктуры и расположение контактов при четырехконтактном измерении сопротивления.

ная зависимость сопротивления пленочной структуры  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$  (BST/LMO/BST) с различной толщиной подслоев. Для состава BST/LMO/BST с толщиной подслоев  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$  453 и 383 нм, соответственно, и с толщиной подслоя  $LaMnO_3$  равной 553 нм были получены наиболее интересные результаты, которые и представлены в этой работе. Исследование других конфигураций гетероструктур продолжается. Сопротивление вдоль границы раздела измерялось четырехзондовым методом. Электрические контакты были нанесены с помощью токопроводящей серебряной пасты на боковой поверхности образцов таким образом, чтобы они находились на интерфейсе гетероструктур, как показано на рис. 1. Образец помещался в криостат охлаждения Janis ST-100 в котором образец находился в контакте с медным пальцем. Температура образца стабилизировалась контроллером LakeShore 325, измерялась с помощью медь-константановой термопары и поддерживалась с точностью  $\pm 0.1$  К.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлено схематическое изображение гетероструктуры BST/LMO/BST на подложке MgO с электродами. На рисунке отмечено, что расположение всех контактов, и через которые подается ток и через которые измеряется падение напряжения на гетероструктуре, при четырехконтактном измерении сопротивления сделано так, чтобы они перекрывали все 3 интерфейса

На рис. 2 представлена температурная зависимость электросопротивления гетероструктуры



**Рис. 2.** Температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  гетероструктуры  $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$  на подложке MgO. На вставке показана блок-схема сопротивления гетероструктуры.

BST/LMO/BST. При температурах выше 175 К температурная зависимость  $R(T)$  электросопротивления исследуемой гетероструктуры имеет активационный вид, характерный для полупроводников. При температуре около 175 К сопротивление достигает максимального значения и в дальнейшем переходит, ниже этой температуры, к режиму, когда сопротивление уменьшается с понижением температуры, что характерно для образцов с металлическим характером проводимости. Оценка энергии активации высокотемпературной части  $R(T)$  дает значение порядка 0.3 эВ.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследовании гетероструктуры BST/LMO/BST на подложке MgO с при температуре ниже 175 К температурная зависимость сопротивления показывает квазиметаллический характер поведения, когда сопротивление гетероструктуры растет при повышении температуры. При этом выше температуры 175 К электросопротивление  $R(T)$  подчиняется активационному закону с энергией активации 0.3 эВ, что соответствует энергии активации  $LaMnO_3$ . Поэтому предлагаем следующее описание поведения сопротивления гетероструктуры BST/LMO/BST, которая соответствует блок-схеме, изображенной на вставке на рис. 2. У нас имеется подложка MgO, три слоя пленок и области интерфейса. Областей интерфейса в данном случае две, но мы изобразили их в виде одного сопротивления, потому что либо они идентичны, либо нижний интерфейс “выключается” в случае, если нижняя пленка BSTO становится по каким-либо причи-

нам полидоменной. Пленки BSTO и подложка MgO диэлектрики, и поэтому ток течет по пленке LMO либо по области интерфейса, где, по видимому, наблюдается квазиметаллическое поведение сопротивления за счет образования 2DEG состояния. При высоких температурах сопротивление пленки LMO достаточно маленькое, ток течет в основном через эту пленку, и поэтому мы наблюдаем активационное поведение сопротивления с энергией активации как у монокристаллического LaMnO<sub>3</sub>. С понижением температуры сопротивление пленки LMO сильно возрастает, и при низких температурах ток течет в основном через область интерфейса. В результате, в этой области температур, наблюдается квазиметаллическое поведение сопротивления. В этом случае наблюдается не чисто металлическое поведение сопротивления, потому что возможно изменение свойств этой интерфейсной области с температурой – могут изменяться как концентрация носителей в этой области, так и характерная толщина области концентрации носителей.

В предыдущих работах было показано существование областей вблизи интерфейса Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub>, на монокристалле LaMnO<sub>3</sub>, демонстрирующих аномальное поведение  $R(T)$ , и что это было связано с реализацией сценария, когда поляризация сегнетоэлектрика на границе раздела экранировалась за счет перестройки электронной структуры в LMO [9, 10]. Вследствие чего в слое LMO вблизи границы раздела возникала повышенная концентрация носителей заряда высокой подвижности. Мы полагаем, что подобный сценарий реализуется и в этой исследуемой гетероструктуре. Отличительной чертой данной гетероструктуры является наличие двух похожих интерфейсов, которые могут вести себя независимо. Это обстоятельство требует дополнительного исследования в последующих работах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано температурное поведение сопротивления гетероструктуры Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/MgO с толщиной слоя LaMnO<sub>3</sub> равной 553 нм. В этой гетероструктуре при температуре выше 175 К температурная зависимость электросопротивления  $R(T)$  демонстрирует активационное поведение. При понижении температуры происходит переход к режиму с квазиметаллическим характером поведения, когда сопротивление гетероструктуры растет при повышении температуры. Аномальная проводимость при низких температурах при этом связывается с перестройкой электронной подсистемы вблизи области интерфейса, приводящей к увеличению концентрации свободных носителей высокой подвижности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00179).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohtomo A., Hwang H.Y. // Nature. 2004. V. 427. P. 423.
2. Niranjana M.K., Wang Y., Jaswal S.S., Tsybal E.Y. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. Art. No. 016804.
3. Thiel S., Hammerl G., Schmehl A. et al. // Science. 2006. V. 313. P. 1942.
4. Reyren N., Thiel S., Cavaglia A.D. et al. // Science. 2007. V. 317. P. 1196.
5. Brinkman A., Huijben M., Van Zalk M. et al. // Nature Mater. 2007. V. 6. P. 493.
6. Kalabukhov A., Gunnarsson R., Borjesson J. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. Art. No. 121404.
7. Moetakef P., Cain T.A., Ouellette D.G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. Art. No. 232116.
8. Pavlov D.P., Zagidullin R.R., Mukhortov V.M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 237001.
9. Павлов Д.П., Пилянина И.И., Мухортов В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 7. С. 440; Pavlov D.P., Pilyanzina I.I., Mukhortov V.M. et al. // JETP Lett. 2017. V. 106. No. 7. P. 460.
10. Kabanov V.V., Pilyanzina I.I., Lysogorskiy Yu.V. et al. // Mater. Res. Express. 2020. V. 7. Art. No. 055020.

## Conductivity of a film heterostructure Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>

A. O. Chibirev<sup>a,\*</sup>, A. V. Leontyev<sup>a</sup>, M. I. Bannikov<sup>a</sup>, R. F. Mamin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Zavoisky Physical-Technical Institute – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, Kazan, 420029 Russia

\*e-mail: chibirev12@mail.ru

The electrical resistance of Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub>/Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub> film heterostructures has been studied. It is shown that the resistance decreases significantly with a temperature below the maximum temperature of about 170 K. Thus, for such heterostructures, the effect of quasi-two-dimensional conductivity was discovered, but only at certain layer thicknesses.