

УДК 537.312.52

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

© 2023 г. А. О. Чибирев¹, *, А. В. Леонтьев¹, Т. М. Салихов¹, 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: chibirev12@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

При исследовании гетероструктуры $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ на подложке MgO обнаружен эффект отрицательной фотопроводимости во время однородного освещения образца монохроматическим зеленым светом со стороны сегнетоэлектрической пленки гетероструктуры. Предложено объяснение эффекта фотосопротивления частичным экранированием поляризации сегнетоэлектрика фотостимулированными носителями заряда.

DOI: 10.31857/S0367676522700946, EDN: NOUHGG

ВВЕДЕНИЕ

Новые функциональные свойства материалов могут возникать при создании сложной гетероструктуры, когда, при воздействии на одну из частей гетероструктуры, изменяются характеристики всей гетероструктуры. Такие возможности просматриваются в гетероструктурах с двумя непроводящими оксидами, которые обладают уникальными транспортными свойствами с высокой проводимостью в области интерфейса. Двумерный электронный газ (2DEG) высокой подвижности был обнаружен впервые на интерфейсе между двумя непроводящими оксидами LaAlO_3 (LAO) и SrTiO_3 (STO) [1]. Исследования таких гетероструктур на основе двух непроводящих оксидов интенсивно проводились в течение последних двух десятилетий [1–5]. Было установлено, что металлическая проводимость возникает в слоях STO на интерфейсе $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ (LAO/STO), когда количество слоев LAO становится больше трех [2, 3]. Было показано, что гетероструктуры LAO/STO также обладают ферромагнитными свойствами [2], и наблюдается переход в сверхпроводящее состояние при температурах ниже 0.3 K [4]. Позже, 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 K [6]. Также 2DEG был обнаружен в других немагнитных диэлектриках. Было установлено, что возникновение 2DEG происходит из-за полярной природы одного из компонентов

гетероструктуры. Состояния с высокой проводимостью также наблюдаются на границе раздела диэлектрических оксидов, один из которых является сегнетоэлектриком [6–8]. Использование сегнетоэлектрических оксидов в таких гетероструктурах дает возможность переключать направление поляризации сегнетоэлектрика и таким образом управлять проводящими свойствами гетероструктуры. Ранее нами было обнаружено высокопроводящее состояние на интерфейсе в гетероструктуре $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ на основе сегнетоэлектрика и диэлектрика [7]. В данной работе мы исследовали влияние освещения на сопротивление гетероструктуры $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$, состоящей из пленок соответствующих составов, нанесенных на подложку MgO, и влияние освещения на проводимость на интерфейсе.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованы влияние освещения на сопротивление пленочной структуры $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ (BST/LMO/BST) с толщиной подслоев $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ 453 и 383 нм, соответственно, и с толщиной подслоя LaMnO_3 , равной 553 нм. Гетероструктуры получались при последовательном нанесении пленок сегнетоэлектрика $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ (BSTO) и манганита LaMnO_3 (LMO) на подложку MgO. Эпитаксиальные пленки BSTO и LMO наносились последовательно при распылении стехиометрических мишеней соответствующих составов методом высокочастотного магнетронного рас-

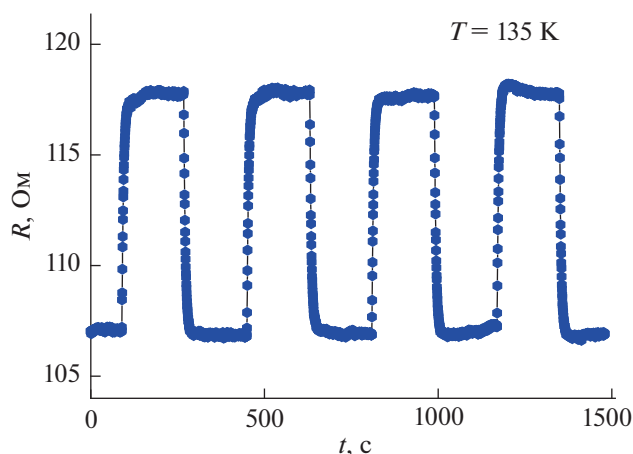


Рис. 1. Динамика изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO после включения и выключения освещения зеленым светом при 135 К.

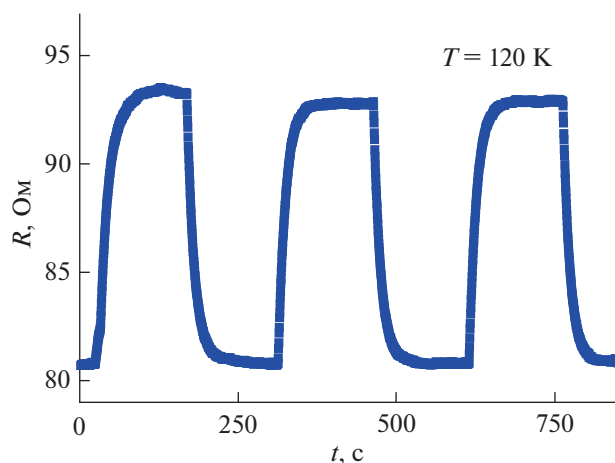


Рис. 2. Динамика изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO после включения и выключения освещения зеленым светом при 120 К.

пыления при 650°C на подложку MgO толщиной 1 мм в ориентации (100). Были исследованы проводящие свойства гетероструктуры BST/LMO/BST и влияние освещения различного спектрального состава на проводящие свойства вдоль интерфейса. Сопротивление вдоль границы раздела измерялось четырехзондовым методом в отсутствие и при освещении зеленым светом со стороны сегнетоэлектрической пленки. Электрические контакты были образованы с помощью токопроводящей серебряной пасты на боковой поверхности образцов таким образом, чтобы они находились на интерфейсе гетероструктур, при этом расстояние между измерительными электродами было разным в разных экспериментах, т. к. контакты создавались непосредственно перед циклом измерений. Образец помещался в криостат охлаждения Janis ST-100, в котором образец находился в контакте с медным пальцем, с которым контактировала медь-константановая термопара. Температура образца стабилизировалась контроллером LakeShore 325 и поддерживалась с точностью ± 0.1 К. Облучение проводили несфокусированным лазерным светом, с пятном диаметром 4 мм, и энергией $\sim 6\text{--}20$ мкДж с использованием зеленого (514 нм) света. Длительность лазерных импульсов составляла 200 фс, частота следования импульсов 3, 1.5 и 0.75 кГц. Свет подавали с использованием кварцевых конденсоров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость сопротивления от температуры резко изменяется ниже 175 К, что можно связать с переходом интерфейса в высокопроводящее состояние, так как такое поведение очень похоже на то, что наблюдалось в гетероструктуре $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$ [7], когда LMO было в ви-

де монокристалла, а не в виде пленки. Поэтому мы провели исследования воздействия света на сопротивление гетероструктуры BSTO/LMO/BSTO при температурах ниже 175 К. Результаты исследования изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO при температурах 135 и 120 К при различных циклах включения/выключения зеленого света, длиной волны 514 нм, и с различной частотой следования импульсов представлены на рис. 1, 2 и 3.

Динамика изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO для тока, текущего через интерфейс, при температуре $T = 135$ К при включении и выключении освещения зеленым светом (длина волны 514 нм) представлена на рис. 1. Эксперимент начинается при выключенном освещении. Видно, что сопротивление образца при освещении возрастает примерно на 9.8%.

На рис. 2 представлена динамика изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO для тока, текущего через интерфейс, при температуре $T = 120$ К при включении и выключении освещения зеленым светом (длина волны 514 нм). Эксперимент также начинался при выключенном освещении. В данном случае сопротивление образца при освещении возрастает уже примерно на 14.8%. При этом характерное время скорости изменения сопротивления для обеих температур составляет около 30–50 с.

Результаты исследования электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO при температуре 135 К после включения и выключения освещения зеленым светом на длине волны 514 нм и с различной частотой следования импульсов 3, 1.5 и 0.75 кГц представлены на рис. 3. На рис. 3 не видно каких-либо заметных изменений при изменении частоты следования импульсов.

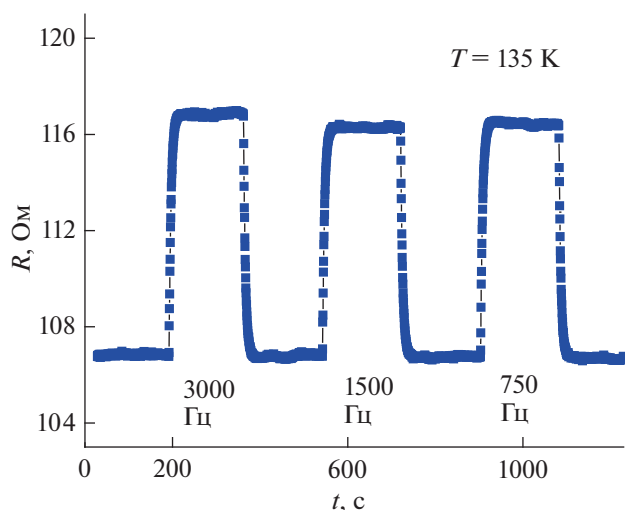


Рис. 3. Динамика изменения электросопротивления образца BSTO/LMO/BSTO при температуре 135 К после включения и выключения освещения зеленым светом и с различной частотой следования импульсов — частоты отмечены на рисунке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженный нами эффект отрицательной фотопроводимости во время однородного освещения светом различного спектрального состава со стороны сегнетоэлектрической пленки гетероструктуры нельзя объяснить нагревом образца. При облучении лазером установившаяся температура приповерхностного объема может расти. Однако при освещении со стороны пленки поглощение происходит по всей толщине сегнетоэлектрической пленки. При этом, по нашим оценкам, изменение температуры даже на поверхности сегнетоэлектрической пленки составляет только около 0.1 К. Если учесть, что проводимость осуществляется в области интерфейса, то эффект нагрева в основной области в нашем случае совершенно отсутствует, так как возможный нагрев на 0.1 К происходит на поверхности сегнетоэлектрической пленки. Практическое отсутствие нагрева обусловлено тем, что мы использовали несфокусированный лазерный луч, и поэтому плотность мощности была сравнительно малой.

Практическое отсутствие изменений на рис. 3 в динамике фотосопротивления, как его максимального значения, так и скорости нарастания/спада при использовании лазерного освещения с различной частотой следования импульсов, также свидетельствует о том, что нагрев не происходит. Если бы в результате нагрева образец не успевал бы полностью остыть до прихода следующего импульса, то температура росла бы с каждым

импульсом. Тогда изменение интервала между импульсами должно было бы значительно влиять на скорость нагрева. Однако на рис. 3 не наблюдается изменений при изменении частоты следования импульсов, что свидетельствует об отсутствии нагрева.

Поскольку наблюдаются довольно медленные релаксационные процессы, мы предполагаем, что такая зарядовая динамика связана с релаксацией в сегнетоэлектрической пленке, потому что релаксационные процессы в металлической части образца должны были бы происходить намного быстрее. Исходя из этого мы предлагаем следующее объяснение наблюдаемого явления отрицательной фотопроводимости. При освещении носители тока, генерируемые в сегнетоэлектрике, будут экранировать поляризацию внутри сегнетоэлектрической пленки. Как следствие, это “эффективное” уменьшение объемной поляризации в пленке сегнетоэлектрика приводит к уменьшению плотности носителей заряда в высокопроводящей области интерфейса, что и приводит к возрастанию проводимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано фотостимулированное изменение сопротивления гетероструктуры $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ на подложке MgO. Обнаружен эффект отрицательной фотопроводимости во время однородного освещения образца монохроматическим зеленым светом со стороны сегнетоэлектрической пленки гетероструктуры. Характерное время скорости изменения сопротивления при включении и выключении света составляет около 30–50 с. Эффект отрицательной фотопроводимости объясняется частичным экранированием поляризации сегнетоэлектрика фотостимулированными носителями заряда.

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. Thiel S., Hammerl G., Schmehl A. et al. // *Science*. 2006. V. 313. P. 1942.
3. Niranjana M.K., Wang Y., Jaswal S.S., Tsybal E.Y. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. Art. No. 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. // *Nature Mater.* 2007. V. 6. P. 493.

6. Pavlov D.P., Zagidullin R.R., Mukhortov V.M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. Art. No. 237001. Piyanzina I.I., Mukhortov V.M. et al. // JETP Lett. 2017. V. 106. No. 7. P. 460.
7. Павлов Д.П., Пианзина И.И., Мухортов В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 7. С. 440; Pavlov D.P., 8. Kabanov V.V., Piyanzina I.I., Lysogorskiy Yu.V. et al. // Mater. Res. Express. 2020. V. 7. Art. No. 055020.

Photoresistance of a film heterostructure
Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃/LaMnO₃/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃/MgO

A. O. Chibirev^a, A. V. Leontyev^a, *, T. M. Salikhov^a, R. F. Mamin^a

^a 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

An effect of illumination by ultrashort laser pulsed light at 514 nm on electrical resistance of Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO₃/LaMnO₃ heterostructure has been observed. In the temperature range below 175 K, illumination causes a reversible increase in the resistance. A time constant linked to the rate of resistance changes is about 30–50 s.