



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.592:621.382

ФОТОТОК СТРУКТУР КРЕМНИЙ/ТИТАНАТ БАРИЯ/НИКЕЛЬ

Ю. Д. КОРНИЛОВА, Е. Б. ЧУБЕНКО, Н. В. ГАПОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 05.03.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. С использованием золь-гель-метода синтезированы фоточувствительные структуры кремний/титанат бария/никель с нелегированным титанатом бария и легированным европием. Изучены вольт-амперные характеристики в условиях освещения ксеноновой лампой с выделением монохроматической линии в диапазоне 400–800 нм и в темновом режиме. Синтезированные структуры показали наличие фототока на обратной ветви вольт-амперных характеристик во всем исследованном диапазоне длин волн освещения. Максимальный ток обратной ветви для структуры с нелегированным титанатом бария был достигнут при воздействии излучения с длиной волны 470 нм и составил около 0,6 мкА для диапазона напряжения смещения от 2 до 10 В. Легирование титаната бария европием приводит к увеличению фототока на 17–26 %.

Ключевые слова: титанат бария, вольт-амперные характеристики, фототок, золь-гель-синтез, европий.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Корнилова, Ю. Д. Фототок структур кремний/титанат бария/никель / Ю. Д. Корнилова, Е. Б. Чубенко, Н. В. Гапоненко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 5. С. 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16>.

PHOTOCURRENT IN SILICON/BARIUM TITANATE/NICKEL STRUCTURES

YULIANA D. KARNILAVA, EUGENE B. CHUBENKO, NIKOLAI V. GAPONENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 05.03.2024

Abstract. Photosensitive silicon/barium titanate/nickel structures with undoped barium titanate and doped europium were synthesized using the sol-gel method. The current-voltage characteristics were studied under illumination with a xenon lamp, highlighting a monochromatic line in the range of 400–800 nm and in dark mode. The synthesized structures showed the presence of a photocurrent on the reverse branch of the current-voltage characteristics over the entire studied range of illumination wavelengths. The maximum reverse branch current for a structure with undoped barium titanate was achieved when exposed to radiation with a wavelength of 470 nm and was about 0.6 μ A for a bias voltage ranging from 2 to 10 V. Doping barium titanate with europium leads to an increase in the photocurrent by 17–26 %.

Keywords: barium titanate, current-voltage characteristics, photocurrent, sol-gel synthesis, europium.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Karnilava Yu. D., Chubenko E. B., Gaponenko N. V. (2024) Photocurrent in Silicon/Barium Titanate/Nikel Structures. *Doklady BGUIR*. 22 (5), 12–16. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-5-12-16> (in Russian).

Введение

Еще в XX веке были проведены исследования основных физико-химических свойств неорганических перовскитов, включая титанат бария, титанат стронция и твердые растворы на их основе [1, 2]. Однако именно в последние годы, наряду с высокой диэлектрической проницаемостью [3], наличием высокоомных и низкоомных состояний [4, 5], спонтанной поляризацией и электрооптическими эффектами [6, 7], исследователей привлекает явление фототока, наблюдаемого в структурах с пленками неорганических перовскитов [8, 9]. Титанат бария, полученный золь-гель-методом, показывает хорошую воспроизводимость свойств и стабильные оптические характеристики [10, 11]. Использование золь-гель-метода дает возможность формировать пленки титаната бария на кремниевых подложках при невысокой температуре для получения гетероструктур и обеспечивать интеграцию фоточувствительных устройств из этого неорганического перовскита с кремниевой схмотехникой на одной подложке.

В статье представлены результаты проведенных исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) и фоточувствительности гетероструктур $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$ и $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$, полученных на основе сформированных золь-гель-методом тонких пленок беспримесного и легированного европием титаната бария.

Методика проведения эксперимента

Пленки титаната бария были получены золь-гель-методом с использованием золя на основе тетраизопророксида титана и ацетата бария, которые последовательно растворялись в смеси уксусной кислоты и ацетилаcetона. Исходная концентрация реактивов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить массовую концентрацию BaTiO_3 в золе 60 мг/мл. Полученные золи методом центрифугирования со скоростью 2700 об./мин наносились на подложки из монокристаллического кремния марки КДБ-20 ($p\text{-Si}$). После нанесения каждого слоя проводились сушка в течение 10 мин при 200 °С на воздухе и последующий отжиг в течение 60 мин при 450 °С также в воздушной атмосфере. Таким способом были изготовлены структуры с трехслойными пленками титаната бария. Пленки титаната бария, легированного европием, получали по вышеописанному методу с добавлением в золь титаната бария ацетата европия для получения концентрации европия в легированном перовските 3 ат. %.

Далее на поверхность пленок титаната бария путем напыления через контактную маску наносились контактные площадки из никеля в форме квадрата со стороной 0,8 мм, а также электрод большей площади, обеспечивающий омический контакт к подложке монокристаллического кремния. Схематическое изображение структуры и схема регистрации ВАХ представлены на рис. 1.

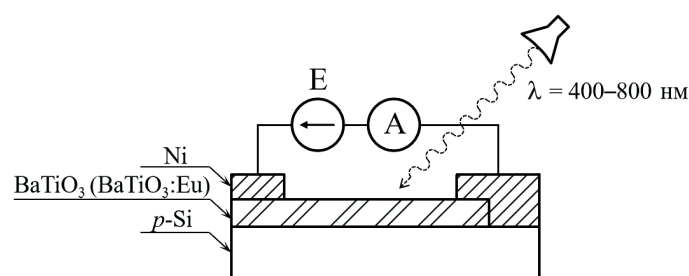


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения гетероструктуры $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3$ с нанесенными контактами и схемой измерения вольт-амперных характеристик
Fig. 1. Schematic representation of the cross section of a $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3$ heterostructure with applied contacts and a circuit for measuring the current-voltage characteristics

ВАХ структур регистрировались при комнатной температуре в интервале напряжений $U = \pm 10$ В при помощи источника-измерителя Keithley 2450. Для измерений использовалась пара электрод меньшей площади/электрод большей площади. Проводились исследования темновых ВАХ при отсутствии освещения, а также при воздействии монохроматического излучения. Для освещения образца использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт, из спектра излучения которой двойным монохроматором Solar ТП DM160 выделяли монохроматические линии в диапазоне длин волн 400–800 нм с шагом 50 нм. Структуры освещались со стороны пленки титаната бария.

Результаты исследований и их обсуждение

Сформированные трехслойные пленки легированного и нелегированного титаната бария являются аморфными, толщина пленок – около 175–180 нм [12]. На рис. 2 представлены результаты измерения ВАХ полученных структур при отсутствии освещения и при воздействии излучения. ВАХ структур соответствуют характеристике выпрямляющей структуры. Освещение поверхности образцов монохроматическим излучением с длиной волны в диапазоне от 400 до 800 нм практически не влияет на прямую ветвь ВАХ. Величина тока, протекающего через структуру при обратном смещении при отсутствии освещения, не превышает 1 нА. В темновом режиме в диапазоне приложенного смещения от 0 до (–10) В малый ток обратной ветви свидетельствует о наличии достаточно высоких энергетических барьеров в гетеропереходе $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3$, препятствующих движению носителей заряда.

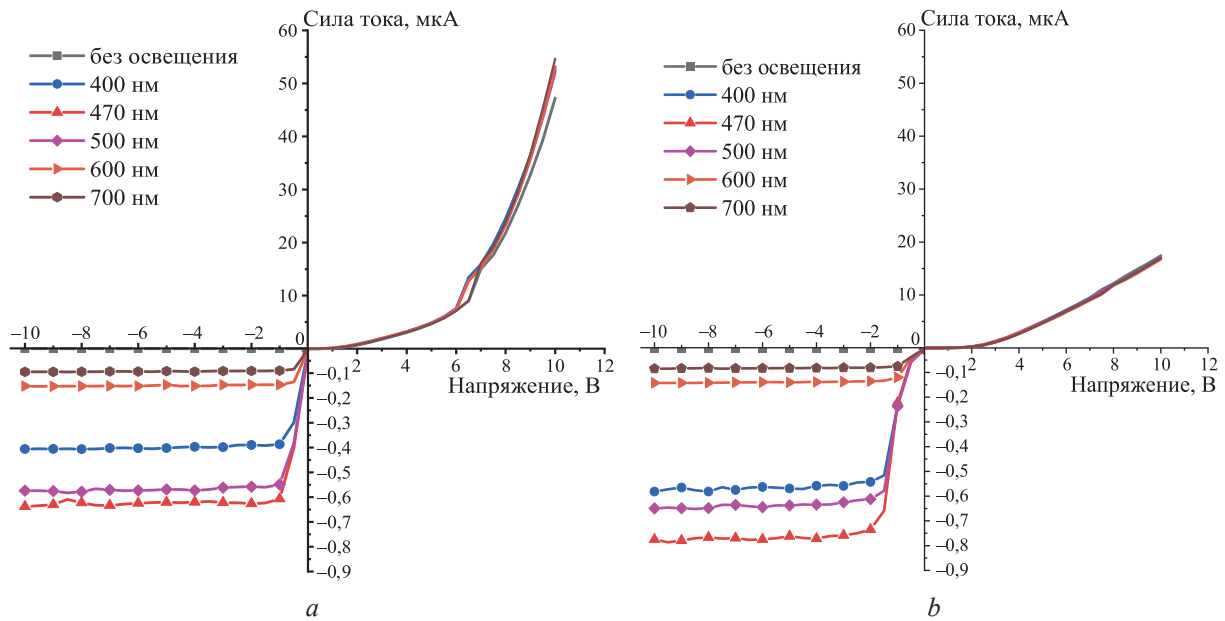


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики полученных структур при воздействии излучения с различной длиной волны: $a - p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$; $b - p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$

Fig. 2. Current-voltage characteristics of obtained structures under radiation with different wavelengths: $a - p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$; $b - p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$

Установлено, что легирование европием титаната бария приводит к уменьшению фототока на прямой ветви ВАХ. Для структуры с пленкой нелегированного титаната бария ($p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$) при напряжении 10 В в условиях воздействия монохроматическим излучением 800 нм значение тока на прямой ветви ВАХ составляет ~55 мкА. Это значение в три раза превышает величину тока, протекающего через структуру с пленкой легированного европием титаната бария ($p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$). Согласно расчету, статическое сопротивление структур с нелегированным и легированным титанатом бария при прямом смещении при напряжении 10 В составляет 182 и 573 кОм соответственно.

В полученных структурах с пленками титаната бария при воздействии излучения наблюдается изменение тока на обратной ветви ВАХ, величина которого зависит от длины волны излучения. Для исследуемых образцов при освещении фототок обратной ветви выходит на насыщение при напряжениях менее 2 В. Для образца с пленкой нелегированного BaTiO_3 наблюдается увеличение максимального значения фототока на обратной ветви ВАХ от 0,03 до 0,64 мкА при освещении в диапазоне от 400 до 800 нм (рис. 2, a), для образца с легированной пленкой $\text{BaTiO}_3:\text{Eu}$ – увеличение фототока от 0,01 до 0,77 мкА (рис. 2, b).

Полученные результаты показывают, что легирование европием приводит к увеличению фототока на обратной ветви ВАХ. Максимальное абсолютное значение фототока обратной ветви наблюдалось при напряжении 10 В в условиях освещения монохроматическим излучением 470 нм. Для структуры $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3:\text{Eu}/\text{Ni}$ при обратном смещении от 2 до 10 В значение фототока было больше на 17–26 %, чем для структуры $p\text{-Si}/\text{BaTiO}_3/\text{Ni}$. Максимальный ток обратной ветви дости-

гался при воздействии излучения с длиной волны 470 нм, что соответствует максимуму интенсивности использованного источника излучения. Полученные данные ВАХ являются усредненными для выборки из трех контактов для каждого образца.

Заключение

1. Получены структуры p -Si/BaTiO₃/Ni и p -Si/BaTiO₃:Eu/Ni, содержащие тонкие пленки титаната бария, синтезированные золь-гель-методом.

2. Установлено, что формирование трехслойных покрытий из титаната бария золь-гель-методом на p -Si приводит к появлению фототока на обратной ветви вольт-амперных характеристик выпрямляющего перехода кремний/титанат бария, величина которого при напряжении 10 В составляет 0,64–0,77 мкА при освещении монохроматическим излучением с длиной волны 470 нм от ксеноновой лампы.

3. Представленные структуры могут найти применение в разработке сенсорных устройств систем освещения.

Список литературы

1. Ржанов, А. В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик / А. В. Ржанов // Успехи физических наук. 1949. Т. 38, вып. 4. С. 461–489.
2. Hoffmann, S. Dielectric Properties, Leakage Behaviour, and Resistance Degradation of Thin Films of the Solid Solution Series Ba(Ti_{1-y}Zr_y)O₃ / S. Hoffmann, R. M. Waser // Integrated Ferroelectrics. 1997. Vol. 17, No 1. P. 141–152. <https://doi.org/10.1080/10584589708012989>.
3. High Dielectric Constant of SrTiO₃ Thin Films Prepared by Chemical Process / F. M. Pontes [et al.] // Journal of Materials Science. 2000. Vol. 35. P. 4783–4787. <https://doi.org/10.1023/A:1004816611050>.
4. Resistance Switching and Retention Behaviors in Polycrystalline La-doped SrTiO₃ Ceramics Chip Devices / S. Hirose [et al.] // Journal of Applied Physics. 2008. Vol. 104, No 5. <https://doi.org/10.1063/1.2975316>.
5. Resistance Switching Behavior of Atomic Layer Deposited SrTiO₃ Film Through Possible Formation of Sr₂Ti₆O₁₃ or Sr₁Ti₁₁O₂₀ Phases / W. Lee [et al.] // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. <https://doi.org/10.1038/srep20550>.
6. Tarun, M. C. Persistent Photoconductivity in Strontium Titanate / M. C. Tarun, F. A. Selim, M. D. McCluskey // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.187403>.
7. Ferroelectric BaTiO₃ Thin-Film Optical Waveguide Modulators / A. Petraru [et al.] // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. P. 1375–1377. <https://doi.org/10.1063/1.149815>.
8. Electrooptic Modulation up to 40 GHz in a Barium Titanate Thin Film Waveguide Modulator / P. Tang [et al.] // Optics Express. 2004. Vol. 12. P. 5962–5967. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005962>.
9. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // Photonics. 2023. Vol. 10, No 4. <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Фототок в структурах кремний/титанат стронция/никель / П. А. Холов [и др.] // Доклады БГУИР. 2018. № 1. С. 19–24.
11. Anaraki, H. S. Photocurrent in Strontium Titanate Films on Silicon Substrates / H. S. Anaraki, N. V. Gaponenko, V. A. Ivanov // Journal of Applied Spectroscopy 2015. Vol. 82. P. 857–860. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0194-9>.
12. Оптические свойства многослойных пленочных структур BaTiO₃/SiO₂, сформированных золь-гель-методом / Н. В. Гапоненко [и др.] // Физика твердого тела. 2019. Т. 63, № 3. С. 528–532. DOI: 10.21883/FTT.2019.03.47246.197.

References

1. Rzhzanov A. V. (1949) Barium Titanate – a New Ferroelectric. *Advances in Physical Sciences*. 38 (4), 461–489 (in Russian).
2. Hoffmann S., Waser R. M. (1997) Dielectric Properties, Leakage Behaviour, and Resistance Degradation of Thin Films of the Solid Solution Series Ba(Ti_{1-y}Zr_y)O₃. *Integrated Ferroelectrics*. 17 (1), 141–152. <https://doi.org/10.1080/10584589708012989>.
3. Pontes F. M., Lee E. J. H., Leite E. R., Longo E., Varela J. A. (2000) High Dielectric Constant of SrTiO₃ Thin Films Prepared by Chemical Process. *Journal of Materials Science*. 35, 4783–4787. <https://doi.org/10.1023/A:1004816611050>.
4. Hirose S., Nakayama A., Niimi H., Kageyama K., Takagi H. (2008) Resistance Switching and Retention Behaviors in Polycrystalline La-doped SrTiO₃ Ceramics Chip Devices. *Journal of Applied Physics*. 104 (5). <https://doi.org/10.1063/1.2975316>.

5. Lee W., Yoo S., Yoon K. J., Yeu I. W., Chang H. J., Choi J.-H., et al. (2016) Resistance Switching Behavior of Atomic Layer Deposited SrTiO₃ Film Through Possible Formation of Sr₂Ti₆O₁₃ or Sr₁Ti₁₁O₂₀ Phases. *Scientific Reports*. 6. <https://doi.org/10.1038/srep20550>.
6. Tarun M. C., Selim F. A., McCluskey M. D. (2013) Persistent Photoconductivity in Strontium Titanate. *Physical Review Letters*. 111. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.187403>.
7. Petraru A., Schubert J., Schmid M., Buchal Ch. (2002) Ferroelectric BaTiO₃ Thin-Film Optical Waveguide Modulators. *Applied Physics Letters*. 81, 1375–1377. <https://doi.org/10.1063/1.1498151>.
8. Tang P., Towner D. J., Hamano T., Meier A. L., Wessels B. W. (2004) Electrooptic Modulation up to 40 GHz in a Barium Titanate Thin Film Waveguide Modulator. *Optics Express*. 12, 5962–5967. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005962>.
9. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Y. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4). <https://doi.org/10.3390/photonics10040359>.
10. Kholov P. A., Gaponenko N. V., Golosov D. A., Zavadski S. M., Kolosnitsin B. S., Ivanov V. A., et al. (2018) Photocurrent in Silicon/Strontium Titanate/Nickel Structures. *Doklady BSUIR*. (1), 19–24 (in Russian).
11. Anaraki H. S., Gaponenko N. V., Ivanov V. A. (2015) Photocurrent in Strontium Titanate Films on Silicon Substrates. *Journal of Applied Spectroscopy*. 82, 857–860. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0194-9>.
12. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Sukalin K. S., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Subasri R., et al. (2019) Optical Properties of Multilayer BaTiO₃/SiO₂ Film Structures Formed by the Sol-Gel Method. *Physics of the Solid State*. 61, 397–401. <https://doi.org/10.1134/S1063783419030120> (in Russian).

Вклад авторов

Корнилова Ю. Д. нанесла пленки неорганических перовскитов на кремниевые подложки, выполнила построение графиков, подготовила рукопись статьи.

Чубенко Е. Б. провел измерение вольт-амперных характеристик структур, принял участие в написании статьи.

Гапоненко Н. В. осуществил постановку задачи исследования, принял участие в интерпретации их результатов и написании статьи.

Authors' contribution

Karnilava Yu. D. deposited films of inorganic perovskites on silicon, completed the construction of graphs, prepared the manuscript of the article.

Chubenko E. B. measured the current-voltage characteristics of the structures, took part in writing the article.

Gaponenko N. V. carried out the formulation of the research problem, took part in the interpretation of the results and writing the article.

Сведения об авторах

Корнилова Ю. Д., асп., мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Нанопотоника» (НИЛ 4.5), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Чубенко Е. Б., канд. техн. наук, вед. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанопотоники», БГУИР

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. НИЛ 4.5, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-75
E-mail: nik@nano.bsuir.edu.by
Гапоненко Николай Васильевич

Information about the authors

Karnilava Yu. D., Postgraduate, Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory “Nanophotonics” (Lab. 4.5), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics”, BSUIR

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Head of the Lab. 4.5, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-75
E-mail: nik@nano.bsuir.edu.by
Gaponenko Nikolai Vasil'evich