

ФОТОТОК В СТРУКТУРАХ КРЕМНИЙ/ТИТАНАТ СТРОНЦИЯ/НИКЕЛЬ

П.А. ХОЛОВ¹, Н.В. ГАПОНЕНКО¹, Д.А. ГОЛОСОВ¹, С.М. ЗАВАДСКИЙ¹
Б.С. КОЛОСНИЦЫН¹, В.А. ИВАНОВ², В.В. КОЛОС³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

²НПЦ НАН Белоруссии по материаловедению, Минск, Республика Беларусь

³ОАО «Интеграл», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 ноября 2017

Аннотация. Золь-гель методом синтезированы пленки титаната стронция SrTiO₃ (ксерогель титаната стронция) на подложках монокристаллического кремния при температуре термообработки 750 °С. Методом магнетронного распыления сформированы верхние электроды из никеля и измерены вольт-амперные характеристики сформированных структур. Обнаружен фототок при освещении структуры кремний/титанат стронция/никель галогенной лампой, а также переключение из низкоомного состояния в высокоомное при напряжении около 10 В как при освещении, так и без него.

Ключевые слова: золь-гель метод, титанат стронция, фототок.

Abstract. The SrTiO₃ (strontium titanate xerogel) films were fabricated on the substrates of monocrystalline silicon using the sol-gel method at the annealing temperature 750 °C. The upper nickel electrodes were fabricated using the magnetron sputtering, and the volt-ampere characteristics of the obtained structures were measured. Photocurrent was observed from the structure silicon/strontium titanate/nickel under illumination with the halogen lamp, as well as switching from low resistance state to high resistance state under and without illumination.

Keywords: sol-gel method, strontium titanate, photocurrent.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 19-24

Photocurrent in the structures of silicon / strontium titanate / nickel

**P.A. Kholov, N.V. Gaponenko, D.A. Golosov,
S.M. Zavadski, B.S. Kolosnitsin, V.A. Ivanov, V.V. Kolos**

Введение

В течение последних двух десятилетий возрос интерес к формированию пленок титаната стронция и изучению их электрофизических свойств. Технология получения пленок титаната стронция представляет интерес для разработки пленочных конденсаторов, мемристоров и варисторов, а также легированных лантаноидами люминофоров [1, 2]. Получены мемристоры на керамических материалах титаната стронция [3], обнаружены высокоомные и низкоомные состояния в тонких пленках титаната стронция [4]. Исследуется фототок в титанате стронция при освещении видимым и ультрафиолетовым излучением [5, 6]. Свойства пленок титаната стронция зависят от технологии получения, и в настоящее время активно исследуется воспроизводимость их физико-химических свойств. В работе показана фоточувствительность пленочной структуры кремний/титанат стронция/никель.

Методика эксперимента

Для формирования ксерогеля титаната стронция были синтезированы золи с использованием ацетата гидрата стронция Sr(CH₃COO)₂·1/2H₂O и тетраизопропоксида Ti(OCH(CH₃)₂)₄. В качестве растворителей использовали уксусную кислоту и монометиловый эфир этиленгликоля. Ацетат стронция смешивали с уксусной кислотой до полного растворения солей. Тетраизопропоксид титана растворяли в монометиловом эфире этиленгликоля. После этого полученные растворы смешали и добавили ацетон в качестве стабилизатора. Использовались золи с концентрацией 45 мг/мл. Золи наносили методом центрифугирования со скоростью 2700 об./мин на подложки монокристаллического кремния *p*-типа. После нанесения

каждого слоя образцы подвергались термообработке при температуре 200 °С в течение 10 мин, после чего проводилась промежуточная термообработка при температуре 550 °С в течение 60 мин. Затем следовала окончательная термообработка в течение 30 мин при температуре 750 °С. Для изготовления диодной структуры формировались верхние электроды из никеля квадратной формы со стороной 0,8 мм, а также электрод большей площади, обеспечивающий омический контакт. Схематично сформированные структуры представлены на рис. 1, *а*, *б*, внешний вид образца представлен на рис. 1, *в*. Морфологический анализ пленок проводился методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке HITACHI S-4800. Спектры рентгеновской дифракции (дифрактограммы) были получены на установке D8 ADVANCE фирмы «Bruker AXS».

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур регистрировались при комнатной температуре в интервале напряжений $U = \pm 10$ В от стабилизированного источника питания ТЕС-23. Напряжение и ток измерялись электронным цифровым вольтметром В7-23 и амперметром В7-27А. Эквивалентная схема измерения представлена на рис. 1, *г*. Существенно, что для проводимых измерений требуется использование вольтметра с высоким внутренним сопротивлением. Структура подключалась к измерительному блоку посредством прижимных нихромовых проводников. Для измерений использовались пары контактов: электрод меньшей площади / электрод большей площади (рис. 1, *а*), как в опубликованных ранее работах [5], или между близлежащими электродами меньшей площади (рис 1, *б*). Исследовались темновые ВАХ, а затем при освещении «белым» светом с интенсивностью 57 мВт/см². Структуры освещались со стороны пленки титаната стронция. В качестве источника освещения использована галогенная лампа КГМ с цветовой температурой вольфрамовой нити накаливания 2850 °С. Температура нити накаливания измерялась с помощью оптического пирометра ЭОП-66 и регулировалась стабилизированным источником питания ТЕС-41. Интенсивность света контролировалась измерителем мощности и энергии излучения ИМО-2Н.

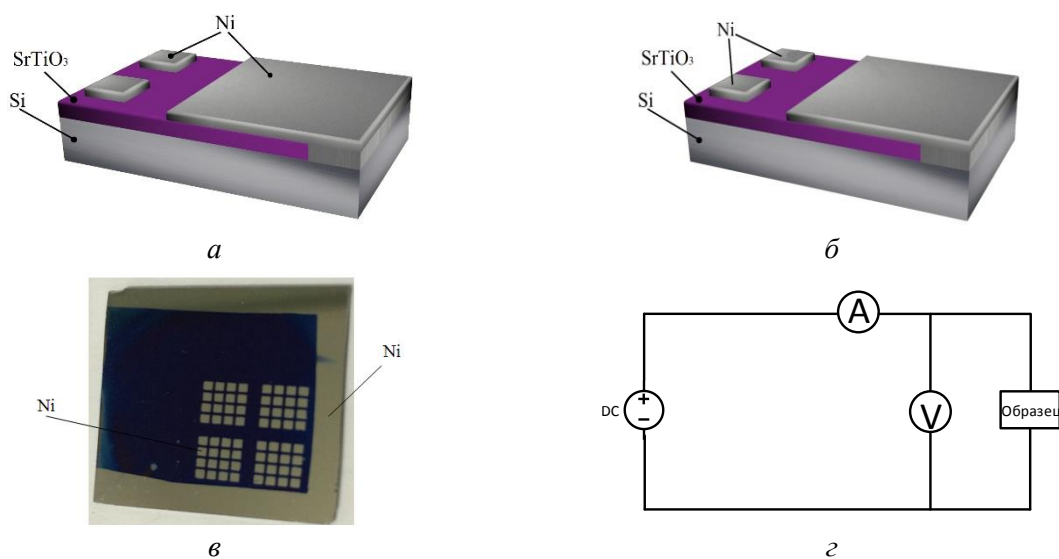


Рис. 1. Структуры никель/титанат стронция/кремний: между большим и меньшим электродами (*а*), между ближайшими меньшими электродами (*б*), типичный внешний вид структуры (*в*), принципиальная схема измерения ВАХ образцов (*г*)

Результаты и их обсуждение

Сформированная пленка титаната стронция имеет поликристаллическую структуру. На рис. 2 представлено РЭМ-изображение пленки ксерогеля титаната стронция, сформированной на монокристаллическом кремнии *p*-типа, после термообработки. Из рис. 2 видно, что толщина пленки составила 53 нм.

На рис. 3 приведена дифрактограмма пятислойной пленки титаната стронция, подвергнутой термообработке при температуре 750 °С в течение 30 мин. Наиболее интенсивный пик дифрактограммы соответствует кристаллографической ориентации (110) (PDF 01-074-1296).

На рис. 4 представлены результаты измерения ВАХ, где кривая 1 соответствует измерениям с освещением, а кривая 2 – без освещения. На ВАХ можно выделить четыре участка: 1) омической проводимости; 2) горизонтальный участок ВАХ; 3) экспоненциального возрастания тока; 4) вертикального роста тока. На рис. 4, а представлены результаты измерения ВАХ структуры, измеренные в разных точках в соответствии со схемой рис. 1, а. Полученная ВАХ без освещения соответствует диоду Шоттки, что наблюдалось авторами и ранее [5].

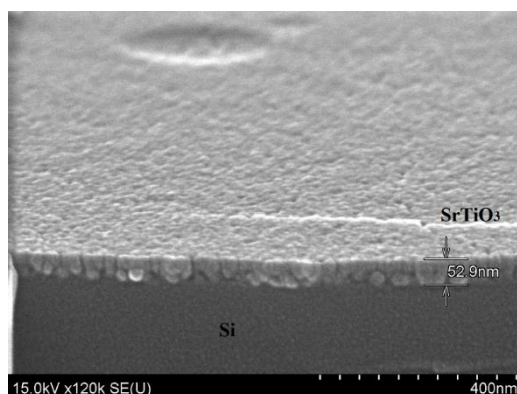


Рис. 2. РЭМ-изображения пленки ксерогеля титаната стронция на монокристаллическом кремнии *p*-типа после термообработки при температуре 550 °С и 750 °С в течение 60 мин

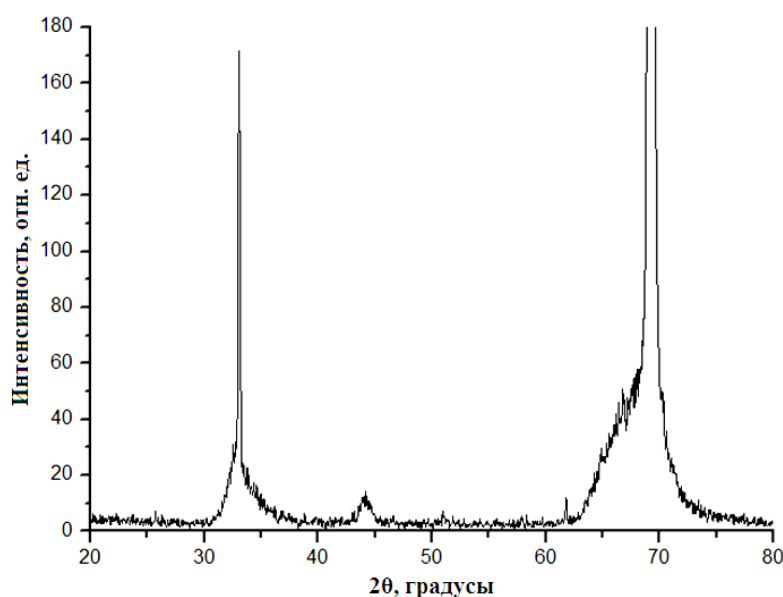


Рис. 3. Дифрактограмма пятислойной пленки титаната стронция, подвергнутой термообработке при температуре 750 °С в течение 30 мин

Исследовались темновые ВАХ, а затем при освещении. Освещение образцов приводит к значительным изменениям на прямой и обратной ветвях ВАХ. При обратном напряжении смещения –5 В фототок составляет 100 мкА, тогда как без освещения ток обратного смещения – 0,6 мкА. При прямом смещении и напряжении +5 В ток прямого смещения – 175 мкА при освещении, а при таком же напряжении без освещения ток значительно возрастает и составляет 10,3 мкА. При прямом смещении и напряжении +5 В ток прямого смещения – 162 мкА при освещении, а при таком же напряжении без освещения ток – 128 мкА.

Авторами обнаружено, что при освещении и увеличении напряжения как при прямом, так и при обратном смещении наблюдается скачкообразное снижение тока, что может характеризовать переключение титаната стронция из низкоомного состояния в высокоомное. При прямом смещении и напряжении +6 В (схема измерения – электрод меньшей площади / электрод большей площади,

рис. 1, а) ток уменьшается до 0,2–1 мкА; аналогичное резкое падение тока наблюдается и при достижении обратного смещения –10 В.

Для измерения между близлежащими электродами меньшей площади в соответствии со схемой рис. 1, б значения фототока с освещением и без освещения уменьшились для обратного смещения, тогда как при прямом смещении значения сопоставимы с измерениями по схеме электрод меньшей площади / электрод большей площади (рис. 4, б). При обратном напряжении –5 В фототок составляет 31,1 мкА, тогда как без освещения ток обратного смещения не превышает 0,53 мкА. При прямом смещении и напряжении +5 В ток прямого смещения – 108 мкА при освещении, а при таком же напряжении без освещения величина тока составляет 8,8 мкА. Существенно, что при хранении аналогичных образцов в комнатных условиях в течение года деградации структуры не происходит и фототок в них наблюдается по-прежнему. Кроме того, фототок наблюдается также и при возбуждении ультрафиолетовым излучением [6]. Генерация фототока и изменение проводимости могут быть обусловлены изменением заселенности глубоких уровней титаната стронция. Изменение сопротивления, наблюдаемое при подаче напряжения свыше 10 В, может быть связано с миграцией вакансий решетки и изменением потенциала барьера между зернами титаната стронция. Отсутствие фототока при нулевом смещении в пределах точности измерений может означать необходимость в изменении потенциального барьера между зернами титаната стронция для регистрации фототока.

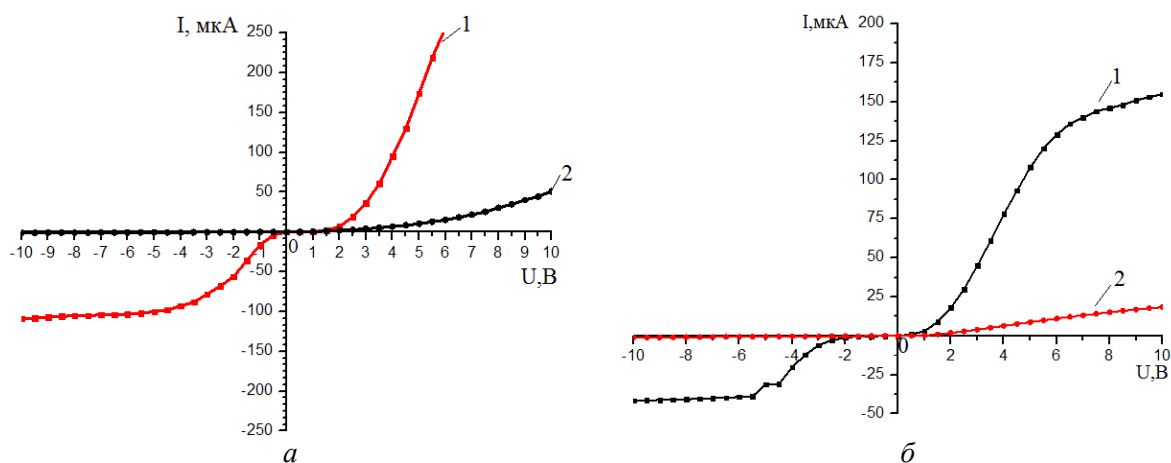


Рис. 4. ВАХ пятислойной пленки титаната стронция на кремнии р-типа: между электродами меньшей площади и большей площади (а), между ближайшими электродами меньшей площади (б)

Заключение

Показано, что структуры кремний/титанат стронция/никель демонстрируют фототок при прямом и обратном смещении, что характеризует воспроизводимость полученных ранее результатов. При этом при освещении изменяются как ВАХ, полученные для сравнительно близких электродов, так и для сравнительно отдаленных электродов. Обнаруженное переключение из низкоомного состояния в высокоомное связано с резким уменьшением сопротивления титаната стронция за счет изменения потенциального барьера между зернами, что вызывает интерес к предложенным структурам как элементам памяти – мемристорам [4]. При этом может появиться возможность формировать структуры без нижнего электрода из платины, что упрощает технологию и открывает возможность повышения температуры синтеза.

Список литературы

1. Исследование люминесцентных свойств $\text{SrTiO}_3:\text{Pr}^{3+}:\text{Al}$ при фотовозбуждении / Б.М. Синельников [и др.] // Вестн. Сев.-Кав. гос. техн. университета. Сер. «Физико-химическая». 2004. № 1 (8). С. 6–15.
2. Photo- and cathodoluminescence of strontium titanate xerogel films doped with terbium ions / M.V. Rudenko [et al.] // J. of Surface Investigation. 2015. Vol. 9, No. 5. P. 1012–1015.
3. Resistance switching and retention behaviors in polycrystalline La-doped SrTiO_3 ceramics chip devices / S. Hirose [et al.] // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 053712 (1–12).
4. Низкоомные и высокоомные состояния в пленках титаната стронция, сформированных золь-гель методом / X. Сохраби Анараки [и др.] // ФТТ. 2015. Т. 57, № 10. С. 1977–1980.

5. Сохраби Анараки Х., Гапоненко Н.В., Иванов В.А. Фототок в ксерогелях титаната стронция // ЖПС. 2015. Т. 82, № 5. С. 800–803.
6. Photocurrent in the diode structure with strontium titanate xerogel films on p-type silicon / Xiang Wang [et al.] // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : proc. of the Intern. conf. «Nanomeeting-2017». Minsk, Belarus, May 30–June 2, 2017. Minsk, 2017. P. 59–61.

References

1. Issledovanie luminescentnyh svojstv SrTiO₃:Pr³⁺:Al pri fotovozbuzhdenii / B.M. Sinel'nikov [i dr.] // Vestn. Sev.-Kav. gos. tehn. universiteta. Ser. «Fiziko-himicheskaja». 2004. № 1 (8). S. 6–15. (in Russ.)
2. Photo- and cathodoluminescence of strontium titanate xerogel films doped with terbium ions / M.V. Rudenko [et al.] // J. of Surface Investigation. 2015. Vol. 9, No. 5. P. 1012–1015.
3. Resistance switching and retention behaviors in polycrystalline La-doped SrTiO₃ ceramics chip devices / S. Hirose [et al.] // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 053712 (1–12).
4. Nizkoomnye i vysokoomnye sostojaniya v plenkah titanata stroncija, sformirovannyh zol'-gel' metodom / H. Sohrabi Anaraki [i dr.] // FTT. 2015. T. 57, № 10. S. 1977–1980. (in Russ.)
5. Sohrabi Anaraki H., Gaponenko N.V., Ivanov V.A. Fototok v kserogeljah titanata stroncija // ZhPS. 2015. T. 82, № 5. S. 800–803. (in Russ.)
6. Photocurrent in the diode structure with strontium titanate xerogel films on p-type silicon / Xiang Wang [et al.] // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures : proc. of the Intern. conf. «Nanomeeting-2017». Minsk, Belarus, May 30–June 2, 2017. Minsk, 2017. P. 59–61.

Сведения об авторах

Холов П.А., аспирант, м.н.с НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гапоненко Н.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Голосов Д.А., к.т.н., доцент, в.н.с. Центра 10.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Завадский С.М., к.т.н., доцент, директор Центра 10.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Колосницын Б.С., к.т.н., профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Иванов В.А., к.ф.-м.н., доцент, в.н.с. «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Колос В.В., к.ф.-м.н., ведущий технолог ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Kholov P.A., PhD student, junior researcher of SRL 4.5 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gaponenko N.V., D. Sci, professor, head of SRL 4.5 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Goloso D.A. PhD, associate professor, leading researcher of Center 10.1 of R&D department of Belarusian State university of informatics and radioelectronics.

Zavadski S.M. PhD, associate professor, head of Center 10.1 of R&D department of Belarusian State university of informatics and radioelectronics.

Kolosnitsin B.S., PhD, professor of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Ivanov V.A., PhD, leading researcher «SPC NAS of Belarus of materials».

Kolos V.V., PhD, leading engineer of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

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

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka 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