

УДК 537.226
DOI: 10.7868/S25000640180304

СВОЙСТВА ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ НА КРЕМНЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

© 2018 г. А.С. Елшин^{1,2}, И.В. Лунев³, С.А. Мигачев¹, Д.К. Жарков¹, Р.И. Баталов¹,
В.В. Базаров¹, Д.А. Бизяев¹, Т.С. Шапошникова¹, Р.Ф. Мамин¹

Аннотация. Исследованы свойства пленок титаната бария-стронция (BST) на кремниевой подложке и возможности их модификации. Измерены и охарактеризованы свойства полученных гетероструктур различными оптическими и диэлектрическими методами. Изучен спектр отражения от пленки BST. На основе этих результатов был смоделирован спектр поглощения, который имеет пик в области 3 эВ. Также имеется перегиб в области 2,6–2,8 эВ, который может соответствовать энергии от верха валентной зоны до нижних уровней системы дефектов пленки BST. Для дополнительной характеристики образцов была использована методика эллипсометрии. На основе этого метода был произведен расчет их оптических констант – коэффициента преломления и коэффициента экстинкции – и определено модельное значение толщины пленки 165 нм. По результатам изучения частотных зависимостей гетероструктуры BST/Si был сделан вывод, что изменения в емкости гетероструктуры связаны с существенным возрастанием проводимости через слой кремния при увеличении частоты. Исследованы фотопроводимость на интерфейсе гетероструктуры и возможность модификации свойств пленок титаната бария-стронция методом лазерного отжига и методом ионной имплантации. Поверхность до и после модификации тестировали методами атомной силовой микроскопии. Метод лазерного отжига не дал существенных результатов. Наиболее перспективным оказался метод модификации пленок титаната бария-стронция на кремниевой подложке методом ионной имплантации при внедрении атомов хрома с энергией 40 КэВ. Было выявлено влияние такой модификации на фотопроводящие свойства пленок. Измерение фотопроводимости показало, что ток на интерфейсе значительно увеличивается при освещении в ультрафиолетовой области спектра. Это увеличение особенно существенно для образцов, модифицированных методом ионной имплантации. Обсуждена возможность увеличения концентрации носителей таким способом при возбуждении *p/n*-перехода для использования в качестве рабочего элемента в солнечных батареях.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические тонкие пленки, ионная имплантация, титанат бария-стронция.

PROPERTIES OF THE BARIUM-STRONTIUM TITANITE FILM ON THE SILICON SUBSTRATE FOR USE IN SOLAR ENERGY

A.S. Elshin^{1,2}, I.V. Lunev³, S.A. Migachev¹, D.K. Zharkov¹, R.I. Batalov¹,
V.V. Bazarov¹, D.A. Bizyaev¹, T.S. Shaposhnikova¹, R.F. Mamin¹

Abstract. The properties of barium-strontium titanate (BST) films on a silicon substrate and the possibility of their modification are investigated. The properties of the heterostructures obtained by various optical and dielectric methods are measured and characterized. The reflection spectrum from the BST film was studied.

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН (Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation), Российская Федерация, 420029, г. Казань, Сибирский тракт, 10/7, e-mail: mamin@kfti.knc.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет (MIREA – Russian technological university, Moscow, Russian Federation), Российская Федерация, 119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78

³ Казанский федеральный университет (Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation), Российская Федерация, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 8

Based on these results, the absorption spectrum was modeled, which has a peak in the region of 3 eV. There is also an inflection in the region of 2.6–2.8 eV, which can correspond to energy from the top of the valence band to the lower levels of the BST film defect system. For further characterization of the samples, the ellipsometry technique was used. On the basis of this method, their optical constants – the refractive index and the extinction coefficient – were calculated and a model value of the film thickness of 165 nm was determined. Based on the results of the study of the frequency dependences of the BST/Si heterostructure it was concluded that changes of the capacity of the heterostructure are related to the increase of conductivity through the Si layer with increasing frequency. The photoconductivity of the heterostructure interface and the possibility of modifying the properties of barium-strontium titanate films by the laser annealing method and the ion implantation method are studied. The surface was tested by atomic force microscopy before and after modification. The laser annealing method did not yield any significant results. The most promising method was the modification of barium-strontium titanate films on a silicon substrate by the ion implantation method with the introduction of chromium atoms with energy of 40 KeV. The effect of modification on photoconductive properties of the films was revealed. The measurement of the photoconductivity has shown that current at the interface increases substantially when illuminated by the ultraviolet light. This increase is particularly high for samples modified by ion implantation. The possibility of carrier concentration increasing by this way is discussed when exciting the p/n junction for use as an operating element in solar batteries.

Keywords: ferroelectric thin films, ion implantation, barium-strontium titanate.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых возобновляемых источников энергии и новых методов ее получения становится с каждым годом все более актуальной задачей. Во всем мире стремительными темпами развивается альтернативная энергетика. Уже в 2013 г., по данным исследовательского подразделения агентства Bloomberg New Energy Finance, в мире было введено в эксплуатацию больше возобновляемых электрогенерирующих мощностей, чем традиционных, использующих минеральное сырье. На сегодняшний день из всех известных человечеству источников альтернативной энергии наиболее популярными являются солнечные панели, батареи и другие генераторы на основе гелиоэнергии. Себестоимость производства солнечной энергии продолжает быстро падать и во многих регионах мира уже либо равна себестоимости традиционной электроэнергии, либо ниже нее. По оценке Международного энергетического агентства, энергия, получаемая за счет преобразования солнечного света, к 2050 г. может стать главным источником энергии в мире. Причина понижения себестоимости солнечной энергии во многом связана с применением новых материалов и с использованием новых методов генерации фотоиндуцированного напряжения.

Для улучшения свойств солнечных элементов (СЭ), прежде всего для повышения поглощательной способности СЭ в более широкой области спектра света [1], на их поверхность наносят всевозможные пленки. Для этих же целей применяют внедрение

различных атомов на поверхности [1; 2]. Также в последнее время часто используют фотовольтаический эффект [3–6], который заключается в прямом преобразовании света в электричество и считается одним из самых надежных и обильных источников возобновляемой и чистой энергии. Объемный фотогальванический эффект заключается в формировании устойчивого фототока и фоточувствительности над полосой пропускания в однофазном однородном материале, не обладающем инверсионной симметрией [6]. Проблеме повышения поглощательной способности СЭ в последние годы посвящено большое число публикаций [3–10]. Было показано, что нарушение симметрии пространственной инверсии необходимо для эффекта, но есть много других факторов, влияющих на величину сдвигового тока. Желательно иметь запрещенную зону в видимом спектре, а также большую плотность состояний на интерфейсах для эффективного захвата падающего света. После возбуждения носителей тока сдвиг быстро распространяется на электроды путем когерентной эволюции токопроводящего состояния. Для этой цели полезно иметь сильно делокализованные состояния носителей в зоне проводимости или в валентной зоне, что будет способствовать когерентной эволюции носителей из основной массы материала в электроды [6]. Существует множество подходов к разработке конкретных материалов, которые могут быть использованы для достижения этих требований, таких как допинг-замещение, введение вакансий, применение штамма и использование низкоразмерных материалов. Кроме того,

недавно было высказано предположение, что настройка топологических фазовых переходов может усилить ответ тока переключения [8–10].

Сегнетоэлектрический фотогальванический эффект (СФВ) в настоящее время активно изучается благодаря переключаемому электрическим полем фотовольтаическому отклику, а также высоким, до 10^4 В, напряжениям [11]. С одной стороны, СФВ-устройства могут сочетать функции поглощения фотонов и разделения зарядов, тогда как другие структуры, основанные на оксидах металлов, такие как n - Cu_2O / p - Cu_2O , могут выполнять только одну из этих функций. Таким образом, СФВ-устройства могут быть выполнены в виде единого активного слоя. С другой стороны, СФВ оперирует малыми фототоками из-за широких запрещенных зон. У титаната бария-стронция ширина запрещенной зоны порядка 3,70 эВ, однако влияние освещения на фотопроводимость становится заметным уже при энергиях фотона около 2,58 эВ [12]. Титанат бария-стронция (BST) может рассматриваться как потенциальный материал для использования в солнечной энергетике. BST подходит для этих целей лучше, чем другие сегнетоэлектрики, так как имеет температуру Кюри, близкую к комнатной температуре. Им можно управлять, меняя концентрацию Sr [13]. Он имеет большую стабильность [12].

За последние два десятилетия наблюдается рост спроса на надежные фотоприемники для обнаружения ультрафиолетового (УФ) излучения из-за его вредного воздействия. Разработка ультрафиолетовых фотоприемников важна из-за возможности их потенциального применения в различных областях науки и техники, включая науку о космосе, авиацию, оборону и другие отрасли промышленности. BST как экологичный материал может найти применение в качестве УФ-фотодетектора [14]. Цирконат-титанат свинца широко используется для изготовления УФ-фотодетекторов благодаря его высокому пьезоэлектрическому коэффициенту, но существует потребность в устройствах, не содержащих свинец.

Интерфейсы между перовскитами интересны как с фундаментальной, так и с практической точки зрения [15]. Генерация фотовозбужденных носителей заряда представляет собой метод управления плотностью носителей и модуляции физических свойств. Очень важным является нахождение новых, наиболее эффективных методов генерации фотоЭДС, основанных на новых физических принципах. Отдельной задачей ставится получение

повышенной концентрации носителей заряда в кремнии в области интерфейса. Идеей наших исследований является создание особого состояния интерфейса при нанесении тонкой сегнетоэлектрической пленки на кремний. При этом возникает так называемая полярная катастрофа, то есть процесс, который позволит аккумулировать дополнительный заряд в кремнии в области интерфейса. Метод создания таких интерфейсов для солнечной энергетике является нашей оригинальной разработкой, которую мы развиваем вместе с группой специалистов под руководством В.М. Мухортова (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону). В настоящей работе мы исследовали гетероструктуру, состоящую из пленки BST толщиной около 200 нм, полученную методом магнетронного распыления [16], на кремневой подложке.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Как образцы были взяты гетероструктуры $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ (BST08) на (100)Si p -типа (12 Ом/см) с использованием в качестве подслоя $\text{Ba}_{0,2}\text{Sr}_{0,8}\text{TiO}_3$ (BST02). Пленки BST на кремниевых подложках были приготовлены группой специалистов под руководством В.М. Мухортова. Были получены поликристаллические пленки хорошего качества с полярной осью c , преимущественно направленной перпендикулярно плоскости интерфейса.

Вначале были предприняты попытки модификации свойств пленки барий-стронций титаната на кремниевых подложках методами лазерного отжига. К сожалению, не удалось подобрать режим обработки, при котором бы свойства пленок улучшались. В большинстве случаев свойства ге-

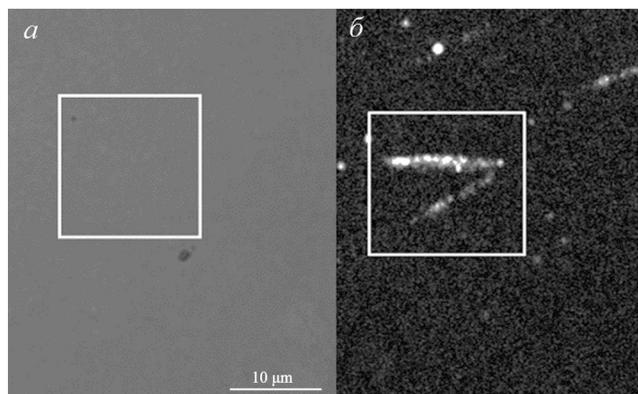


Рис. 1. Линейно-оптическое (а) и нелинейно-оптическое (б) изображение пленки BST.

Fig. 1. Linear-optical (a) and nonlinear-optical (b) BST images.

тероструктур практически не изменялись. Поэтому было принято решение использовать для модификации свойств пленок метод ионной имплантации. Имплантация осуществлялась ионами Sr^+ с энергией 40 КэВ, дозой $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$, с плотностью тока $j = 0,6 \text{ мкА/см}^{-2}$. В настоящей статье представлены только первые результаты изучения свойств модифицированной гетероструктуры. До и после имплантации для получения информации о поверхности пленок исследована топография поверхности методом атомной силовой микроскопии (АСМ).

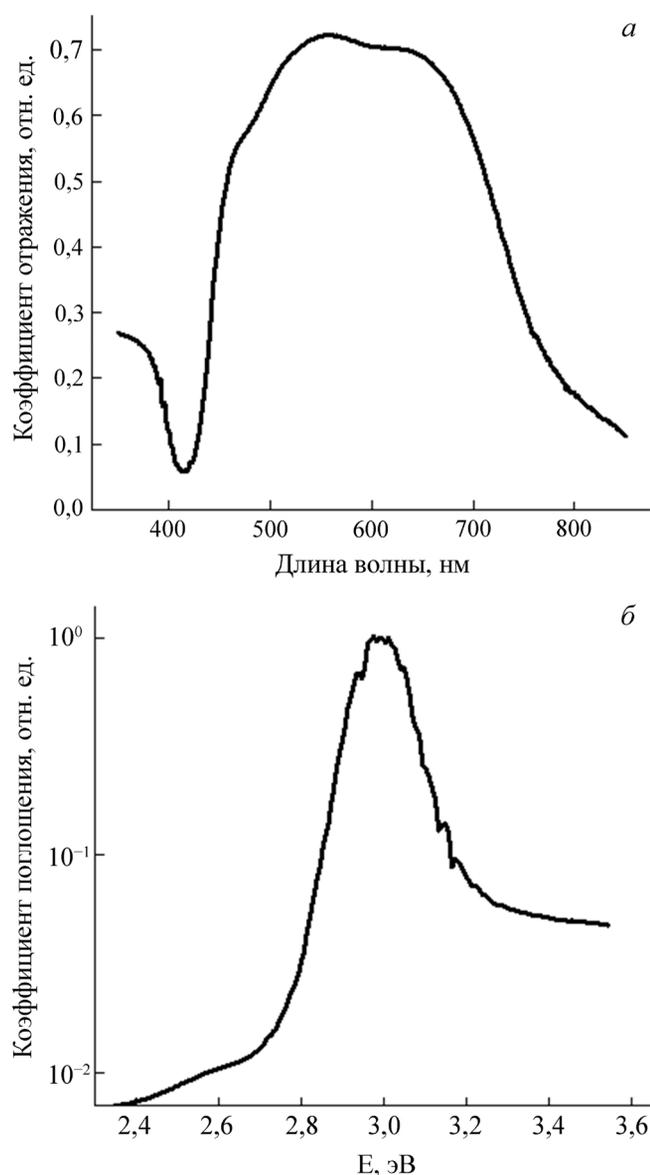


Рис. 2. Спектр отражения от BST, нормированный на интенсивность источника (*a*). Оценка (расчет) для спектра поглощения BST в УФ-области (*б*).

Fig. 2. BST reflection spectrum normalized on the intensity of light source (*a*). Estimation (calculation) of BST absorption spectrum in UV range (*b*).

Для измерений методикой нелинейно-оптической микроскопии использовался конфокальный микроскоп Witec Alpha 300 с заведением лазерного луча с длиной волны 800 нм, длительностью импульса 100 фс и частотой повторения 100 МГц. Излучение второй оптической гармоники (ВГ) с длиной волны 400 нм собиралось с помощью фотоэлектронного умножителя. Для определения дополнительных оптических характеристик была применена методика эллипсометрии. При этих исследованиях использовался спектроскопический эллипсометр ES-2 с бинарной модуляцией поляризации на длинах волн 380–1050 нм, со спектральным разрешением 6 нм, размером шага во время измерений 10 нм и углом падения светового луча $\Psi = 70^\circ$. Особенности работы эллипсометра ES-2 описаны в статье [17]. Рассчитанные спектральные зависимости эллипсометрических углов $\Psi_{\text{теор}}(\lambda)$ и $\Delta_{\text{теор}}(\lambda)$, полученные путем вариации переменных d_{exp} , n и k , сопоставлялись с экспериментальными значениями $\Psi_{\text{эксп}}(\lambda)$ и $\Delta_{\text{эксп}}(\lambda)$ для получения наилучшего их совпадения. Для измерения коэффициента отражения были использованы диодная лампа Thorlabs SOLIS-1C, монохроматор Andor SHAMROCK 750, фотодиод Thorlabs DET36A, синхронный детектор SR830 DSP. Диэлектрические измерения были выполнены в частотном диапазоне 1 Гц – 1 МГц на диэлектрическом спектрометре Novocontrol BDS-80 с автоматическим контролем температуры Quatro, с точностью 0,5 °С. В этом случае на исследуемые образцы (в виде плоскопараллельной пластины) с двух сторон наносился проводящий клей на основе графита в виде окружности диаметром d ($d = 2,5 \text{ мм}$, толщина кристалла составляла $h = 0,27 \text{ мм}$), к которой подклеивались соединительные контакты из медной проволоки. Образец помещался в измерительную головку, которая в свою очередь помещалась в криотермостат Quatro.

Для измерения фотопроводимости на образец были нанесены 4 электрода в ряд в области интерфейса. На внешние два электрода через резистор с сопротивлением 8,5 КОм подавалось постоянное напряжение 5 В. Величина сопротивления резистора была выбрана с тем расчетом, чтобы оно было заведомо много выше сопротивления образца, чтобы можно было пренебречь изменением силы тока. С помощью вольтметра на этом резисторе измерялось падение напряжения для расчета силы тока. С двух внутренних электродов сигнал поступал на синхронный усилитель. На образец перпендикулярно падало излучение через механический прерыватель.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На оптическом изображении (рис. 1а) образец выглядит однородным. Образец BST был просканирован в нелинейно-оптическом режиме (рис. 1б). На изображении видно, что вторая гармоника присутствует только в локальных областях, которые не видны на линейно-оптическом изображении. Кроме этих локальных областей пленка BST не показывает нелинейно-оптического отклика. Так как нелинейно-оптические свойства этого материала хорошо известны, то отсутствие нелинейно-оптического отклика может говорить о том, что вектор поляризации пленки BST направлен перпендикулярно плоскости пленки и вследствие геометрии микроскопии не дает сигнала ВГ.

Произведена попытка локальной модификации свойств пленки с помощью локального отжига фемтосекундным лазером со средней по времени плотностью мощности 300 мВт и длиной волны 800 нм. Сканирование области отжига не показало нелинейно-оптического отклика. На линейно-оптическом изображении область отжига не изменилась.

Спектр отражения от пленки BST (интенсивность отраженного излучения, деленная на интенсивность падающего) приведен на рисунке 2а. Из спектра отражения был смоделирован спектр поглощения (рис. 2б), который имеет пик в области 3 эВ. Также имеется перегиб в области 2,6–2,8 эВ, который может соответствовать энергии от верха валентной зоны до нижних уровней системы дефектов пленки BST. Эти дефектные области должны быть ответственны за активационную проводимость и определяют спектр фотопроводимости BST [12].

Эллипсометрические измерения (рис. 3) показали толщину пленки 165 нм в модели «подложка Si / подслой BST02 / пленка BST08». С помощью формулы Зельмейера были получены значения коэффициента преломления n и коэффициента экстинкции k в зависимости от длины волны (рис. 4). С учетом рассчитанных n и k расчетная зависимость эллипсометрических параметров в достаточной степени совпадает с экспериментальной. Эллипсометрические параметры образцов с допированием и без показали одинаковые результаты. По-видимому, использованной дозы имплантации недостаточно для изменения оптических параметров n и k имплантированного слоя. Толщина им-

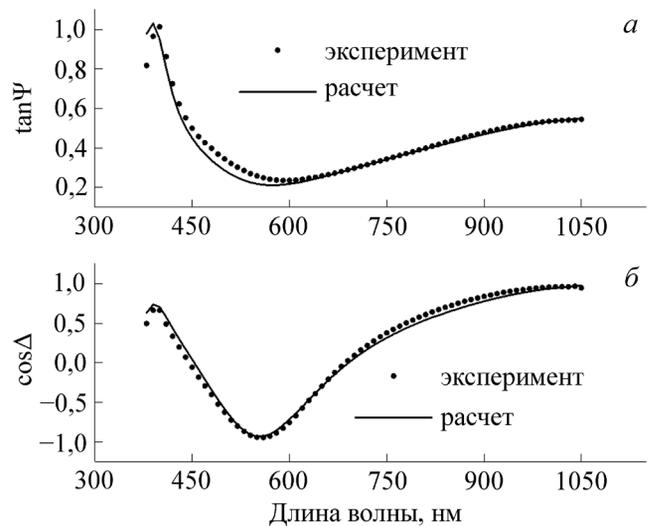


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные эллипсометрические параметры $\tan\Psi$ (а) и $\cos\Delta$ (б).

Fig. 3. Measured and calculated ellipsometric parameters $\tan\Psi$ (a) and $\cos\Delta$ (b).

плантированного слоя, рассчитанная в программе SRIM-13, составила 40 нм.

Для характеристики гетероструктуры BST/Si мы изучили частотные зависимости гетероструктуры в целом в архитектуре электродов, когда один электрод накладывался на пленку, а второй – на противоположный от пленки торец подложки. Частотные зависимости емкости и проводимости гетероструктуры BST/Si представлены на рисунке 5. Видно, что на всем диапазоне частот емкость уменьшается, а проводимость растет. В области частот 1000–10000 Гц происходит наиболее сильное уменьшение емкости, а проводимость в этом

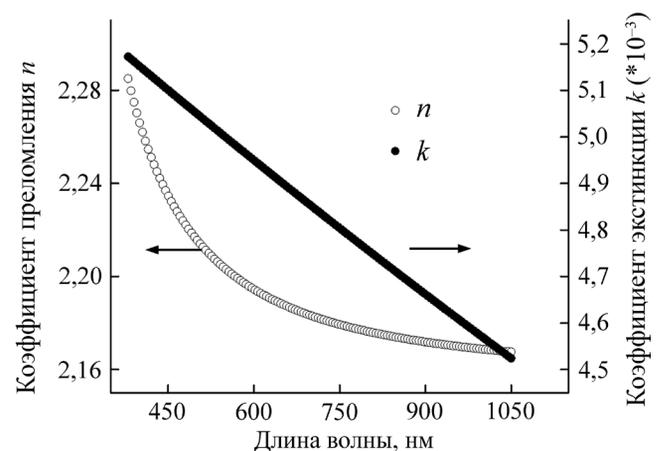


Рис. 4. Расчетные значения коэффициентов преломления n и экстинкции k пленки BST, по формуле Зельмейера.

Fig. 4. Refractive index n and extinction coefficient k calculated by Sellmeier equation.

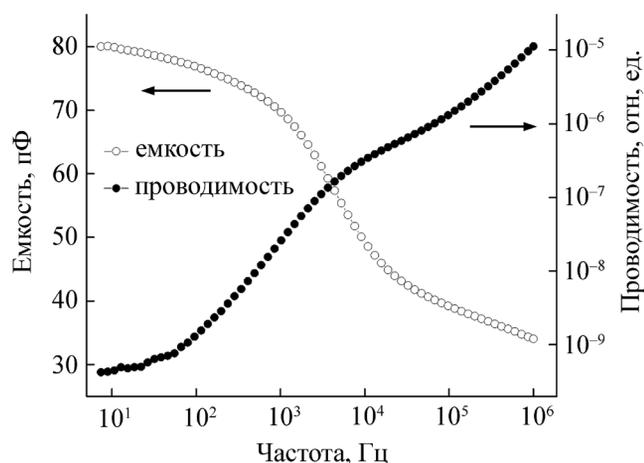


Рис. 5. Емкость и проводимость гетероструктуры BST/Si в зависимости от частоты.

Fig. 5. Capacity and conductivity of BST/Si heterostructure.

диапазоне возрастает наиболее быстро. По нашему мнению, все эти изменения, в том числе и изменения в общей емкости гетероструктуры, связаны с существенным возрастанием проводимости через слой кремния при увеличении частоты.

Далее была произведена модификация свойств пленки. Для этого использовался метод ионной имплантации. Мы сознательно использовали малые интенсивности воздействия, чтобы изменение свойств происходило только в части пленки и никоим образом не влияло на интерфейс и на кремний. Только в этом случае можно выделить эффект, связанный с модификацией свойств пленки.

Исследование топографии поверхности пленок BST до имплантации (рис. 6а) и после имплантации Cr^+ (рис. 6б) не выявило существенных изменений поверхности, что свидетельствует о том, что внедрение ионов хрома оказало слабое воздействие на структуру пленки. Поэтому можно считать, что ионы хрома находятся в окружении матрицы той же конфигурации, что была до имплантации. Высота профиля в обоих случаях составляет порядка 30 нм, с горизонтальным шагом порядка 0,2–0,5 мкм.

Зависимость фотопроводимости от длины волны для образцов BST и BST + Cr представлена на рисунке 7. Обе зависимости имеют схожий характер, но фотопроводимость в гетероструктуре с BST, имплантированным Cr^+ , на порядок выше, чем фотопроводимость в гетероструктуре с чистым BST. Для обоих образцов фотопроводимость максимальна при минимально используемой длине волны 350 нм и спадает к 420 нм. В диапазоне 420–450 нм фотопроводимость практически не меняется. Таким образом, исследования фотопроводимости гетероструктур на основе пленок BST на кремниевой подложке показало, что ток на интерфейсе существенно увеличивается при освещении в ультрафиолетовой области спектра с длиной волны порядка 350 нм. Это соответствует области поглощения энергий, при которой осуществляется прямой заброс из валентной зоны в зону проводимости BST. Это увеличение особенно существенно для образцов, модифицированных ионами Cr^+ ме-

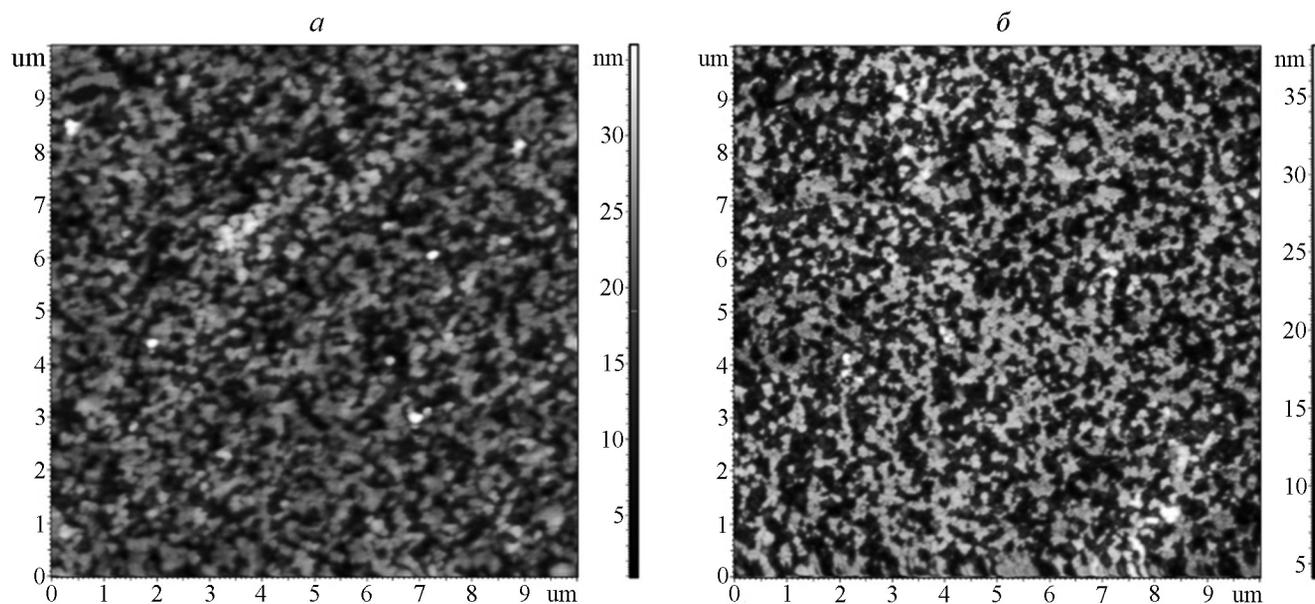


Рис. 6. Топография поверхности пленок BST (а) и BST + Cr (б), полученная методом АСМ.

Fig. 6. Topography of BST (a) and BST + Cr (b) films surface observed by AFM method.

тодом ионной имплантации. Поэтому можно сделать вывод о том, что появляется возможность увеличения концентрации носителей при возбуждении p/n -перехода в ультрафиолетовой области спектра, если в качестве дополнительного слоя использовать пленку BST. Этот физический принцип можно использовать для создания материалов по данной архитектуре, которые могут в дальнейшем применяться в качестве рабочих элементов в солнечных батареях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из данных нелинейно-оптической микроскопии, можно сделать вывод о том, что вектор поляризации BST направлен перпендикулярно плоскости пленки. Эллипсометрия образцов BST и BST + Cr показала сходные результаты, по которым была рассчитана толщина пленок 165 нм, а также коэффициенты n и k . По нашей оценке, глубина имплантации составила 40 нм. Измерения фотопроводимости показали, что фототок на интерфейсе существенно увеличивается при освещении гетероструктур в ультрафиолетовой области спектра с длиной волны порядка 350 нм. Кроме этого, происходит увеличение фототока на интерфейсе еще на порядок величины в образцах, подвергнутых ионной имплантацией. В результате сделан вывод о том, что можно увеличить концентрацию носителей при возбуждении p/n -перехода в ультрафиолетовой области спектра, применяя пленку BST в качестве дополнительного слоя. Такие гетероструктуры можно использовать для создания материалов, которые

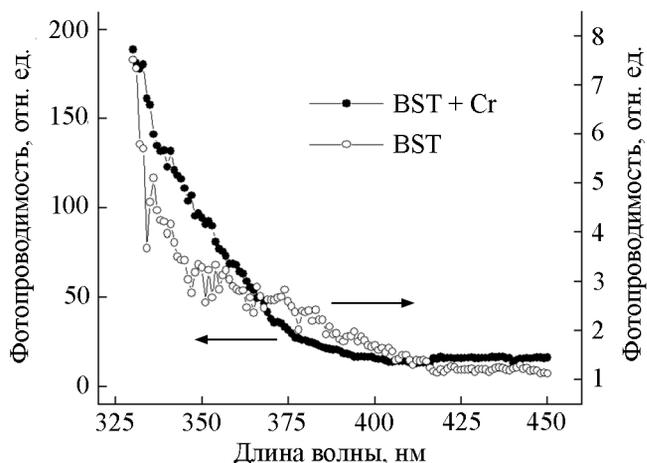


Рис. 7. Фотопроводимость пленок BST и BST + Cr в зависимости от длины волны.

Fig. 7. BST and BST + Cr photoconductivity dependence on wavelength.

будут служить в качестве рабочих элементов солнечных батарей, основанных на новых принципах и работающих в более широком спектральном диапазоне.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В.М. Мухортову за приготовление образцов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 18-42-16005. Работа А.С. Елшина была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 17-32-50047.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Solanki Ch.S., Singh H.K. 2017. *Anti-refraction and Light Trapping in c-Si Solar Cells*. Singapore, Springer: 186 p. doi: 10.1007/978-981-10-4771-8
- Green M.A. 2009. The path to 25% Silicon solar cell efficiency: History of Silicon cell evolution. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 17(3): 183–189. doi: 10.1002/pip.892
- Yang S.Y., Seidel J., Byrnes S.J., Shafer P., Yang C.-H., Rossell M.D., Yu P., Chu Y.-H., Scott J.F., Ager III J.W., Martin L.W., Ramesh R. 2010. Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices. *Nature Nanotechnology*. 5: 143–147. doi: 10.1038/NNANO.2009.451
- Daranciang D., Highland M.J., Wen H., Young S.M., Brandt N.C., Hwang H.Y., Vattilana M., Nicoul M., Quirin F., Goodfellow J., Qi T., Grinberg I., Fritz D.M., Cammarata M., Zhu D., Lemke H.T., Walko D.A., Dufresne E.M., Li Y., Larsson J., Reis D.A., Sokolowski-Tinten K., Nelson K.A., Rappe A.M., Fuoss P.H., Stephenson G.B., Lindenberg A.M. 2012. Ultrafast photovoltaic response in ferroelectric nanolayers. *Phys. Res. Lett.* 108(8): 087601. doi: 10.1103/PhysRevLett.108.087601
- Wang F., Young S.M., Zheng F., Grinberg I., Rappe A.M. 2016. Substantial bulk photovoltaic effect enhancement via nanolayering. *Nature communications*. 7: 10419. doi: 10.1038/ncomms10419
- Tan L.Z., Zheng F., Young S.M., Wang F., Liu S., Rappe A.M. 2016. Shift current bulk photovoltaic effect in polar materials-hybrid and oxide perovskites and beyond. *Npj Computational Materials*. 2: 16026. doi: 10.1038/npjcompumats.2016.26
- Young S.M., Rappe A.M. 2012. First principles calculation of the shift current photovoltaic effect in ferroelectrics. *Phys. Res. Lett.* 109(11): 116601. doi: 10.1103/PhysRevLett.109.116601
- Liu S., Zheng F., Rappe A.M. 2017. Giant Bulk Photovoltaic Effect in Vinylene-Linked Hybrid Heterocyclic Polymer. *J. Phys. Chem. C*. 121(12): 6500–6507. doi: 10.1021/acs.jpcc.7b00374
- Wang F., Grinberg I., Rappe A.M. 2014. Semiconducting ferroelectric photovoltaics through Zn^{2+} doping into $KNbO_3$

- and polarization rotation. *Phys. Rev. B.* 89(23): 235105. doi: 10.1103/PhysRevB.89.235105
10. Ji Zh., Addison Z., Liu G., Liu W., Yu P., Liu Zh., Rappe A., Kane Ch., Mele E., Agarwal R. 2018. Spatially Dispersive Circular Photogalvanic Effect in Weyl Semimetals. *Bulletin of the American Physical Society*. APS March Meeting 2018. Abstract: R10.00007.
11. Han H., Kim D., Chu K., Park J., Nam S.Y., Heo S., Yang Ch.-H., Jang H.M. 2018. Enhanced switchable ferroelectric photovoltaic effects in hexagonal ferrite thin films via strain engineering. *ACS applied materials & interfaces*. 10(2): 1846–1853. doi: 10.1021/acsami.7b16700
12. Irzaman, Putra I.R., Aminullah, Syafutra H., Alatas H. 2016. Development of ferroelectric solar cells of barium strontium titanate ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) for substituting conventional battery in LAPAN-IPB satellite (LISAT). *Procedia Environmental Sciences*. 33: 607–614. doi: 10.1016/j.proenv.2016.03.114
13. Zhou L., Vilarinho P.M., Baptista J.L. 1999. Solubility of bismuth oxide in barium titanate. *Journal of the American Ceramic Society*. 82(4): 1064–1066. doi: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01875.x
14. Sharma S., Tomar M., Puri N.K., Gupta V. 2015. Ultraviolet radiation detection by barium titanate thin films grown by sol–gel hydrothermal method. *Sensors and Actuators A: Physical*. 230: 175–181. doi: 10.1016/j.sna.2015.04.019
15. Yan H., Wang J.Y., Zhang Z.T., Yang B., Chen C.L., Jin K.X. 2017. Photoexcited-carrier transport in barium strontium titanate/strontium titanate heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 122(11): 115307. doi: 10.1063/1.4986615
16. Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtzov A.N. 2000. The synthesis mechanism of complex oxide films formed in dense RF – plasma by reactive sputtering of stoichiometric targets. *Ferroelectrics*. 247(1): 75–83. doi: 10.1080/00150190008214943
17. Khomich A.V., Kovalev V.I., Zavedeev E.V., Khmel'nitskiy R.A., Gippius A.A. 2005. Spectroscopic ellipsometry study of buried graphitized layers in the ion-implanted diamond. *Vacuum*. 78(2–4): 583–587. doi: 10.1016/j.vacuum.2005.01.090

Поступила 15.06.2018