

СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$

М.В. Бушинский¹, Г.М. Чобот¹, Л.В. Баран², В.В. Малютина-Бронская³,
Б.М. Обрадович⁴, Н.М. Сакан⁵, Н.А. Босак^{6*}

УДК 621.373.826:533.9+537.9

¹ГО “НПЦ НАН Беларуси по материаловедению”,

ул. Петруся Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, bushinsky@physics.by

²Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, baran@bsu.by

³ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника”,

пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь, malyutina@oelt.basnet.by

⁴Белградский университет, Белград, Сербия, Bratislav Obradovic <obrat@ff.bg.ac.rs>

⁵Институт физики, г. Белград, Сербия, nsakan@ipb.ac.rs (Institute of Physics Belgrade)

⁶Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,

пр. Независимости 68-2, 220072 Минск, Беларусь, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

(Поступила февраля 2024)

Методом высокочастотного импульсно-периодического $f \sim 10\text{--}13$ кГц воздействия лазерного излучения с длиной волны $1,064$ мкм и плотностью мощности $q = 57$ МВт/см² на керамику $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ при давлении в вакуумной камере $p = 4,6$ Па получены наноструктурированные тонкие пленки на кремниевой подложке. Изучена морфология тонких пленок $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ с помощью атомно-силовой микроскопии. Получены спектры пропускания пленок в видимой, ближней и средней ИК-области. Проведен анализ электрофизических свойств структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$.

Ключевые слова: высокочастотное лазерное воздействие; структура тонких пленок; спектры пропускания и отражения; электрофизические характеристики.

STRUCTURAL, OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3$ FILMS

M.V. Bushinsky¹, G.M. Chobot¹, L.V. Baran², V.V. Malyutina-Bronskaya³, B.M. Obradovic⁴,
N.M. Sakan⁵, N.A. Bosak^{6*}

UDK 621.373.826:533.9+537.9

¹⁾ I) GO “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science”, st. Petrusya Brovki 19, 220072 Minsk, Belarus, bushinsky@physics.by

²⁾ Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, baran@bsu.by

³⁾ GNPO “Optika, optoelektronika i lazernaya tehnika”,
68 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, malyutina@oelt.basnet.by

⁴⁾ University of Belgrade, Belgrade, Serbia, Bratislav Obradovic <obrat@ff.bg.ac.rs>

⁵⁾ Institute of Physics, Belgrade, Serbia, nsakan@ipb.ac.rs (Institute of Physics Belgrade)

⁶⁾ B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,
68-2 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

By the method of high-frequency repetitively pulsed $f \sim 10\text{--}13$ kHz laser radiation with a wavelength $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ and a power density $q = 57 \text{ MW/cm}^2$ on $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3$ target at a pressure in the vacuum chamber $p = 4.6 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$. Nanostructured thin films on a silicon substrate have been obtained. The morphology of thin $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3$ films was studied using atomic force microscopy. Transmission spectra of $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3$ films were obtained in the visible, near and mid-IR regions. The electrophysical characteristics of $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ structures are analyzed.

Keywords: high-frequency laser irradiation; the structure of thin films; transmission and reflection spectra, electrophysical characteristics.

Введение

Мультиферроики – это класс материалов, имеющих одновременно сегнетоэлектрическое и ферромагнитное упорядочение. Мультиферроик на основе феррита висмута-железа (BiFeO_3) привлекает большое внимание исследователей из-за его потенциального применения в спинтронике, датчиках, микроэлектронике, для хранения данных и других [1-6]. Исследования показали, что содержание висмута не влияет на электрические и структурные свойства соединения. Также установлено, что даже невысокая концентрация примеси La оказывает огромное влияние на оптические, электрические и диэлектрические свойства материала. BFO представляет собой термодинамически нестабильный однофазный мультиферроик. Добавление La^{3+} приводит к повышению термической стабильности, улучшению кристалличности и обеспечению однофазного образования [7]. В работе [8] показано, что ширина запрещенной зоны исследуемого материала возрастает с увеличением концентрации La, что может быть обусловлено изменением структуры кристаллической решетки. Для структур, легированных La, наблюдалась большая оптическая ширина запрещенной зоны от 3.024 до 3.095 эВ в зависимости от содержания La от 0.02 до 0.06, в то время как для BFO ширина запрещенной зоны < 2.73 эВ. В [6] продемонстрировано, что высокие концентрации доноров La^{3+} (> 0.3 %) на границах зерен тормозят их рост. При увеличении концентрации доноров La^{3+} до 0.15 % проводимость возрастает, а при концентрации 0.3 % снижается. В области высокой проводимости доминирует электронная компенсация примеси, после критической концентрации доноров La^{3+} доминирует компенсация катионных вакансий и электропроводность уменьшается [9]. Внедрение доноров на границе зерен приводит к образованию слоев с высоким сопротивлением. Для практического применения интерес представляют соединения на основе легированного феррита висмута-железа, полученные в виде тонких пленок [4, 5, 10-12]

В данной работе исследованы оптические и электрические свойства тонких пленок $\text{La}_{0.13}\text{Bi}_{0.87}\text{FeO}_3$, осажденных в вакууме на кремниевую и стеклянную подложки при многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии [13]. Изучена морфология полученных тонких пленок с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), выявлены особенности спектров пропускания в ближней и средней ИК-области и спектров отражения в видимой и ближней ИК-областях, исследованы вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики.

Экспериментальная установка и методы исследований

Поликристаллическая мишень состава $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ была изготовлена по керамической технологии твердофазного синтеза на воздухе. Окончательный синтез мишени проходил при температуре 970°C в течение 8 ч. Затем мишень охлаждалась в течение 12 ч до температуры 300°C . Рентгеноструктурные исследования полученной мишени были проведены при комнатной температуре на дифрактометре ДРОН-3М в $\text{Cu K}\alpha$ излучении и показали отсутствие посторонних фаз.

Пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ осаждались методом высокочастотного лазерного распыления керамической мишени в вакууме ($p = 3,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). Экспериментальная лазерная установка ($\lambda = 1,06$ мкм) с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц содержала: источник лазерного излучения, оптическую систему транспортировки лазерного излучения к распыляемой мишени, вакуумную камеру и измерительно-диагностический модуль. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора из радиационно облученного кристаллического фторида лития LiF с F_2^- -центрами окраски; длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла $\tau \sim 85$ нс. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 57 \text{ МВт/см}^2$ и частоте повторения импульсов $f \sim 10\text{--}13$ кГц.

Морфология поверхности пленок $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$, осажденных на стеклянную и монокристаллическую кремниевую подложки, изучалась методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO. Использовались стандартные бесконтактные кремниевые кантилеверы с радиусом кривизны кончика иглы менее 10 нм. Исследование морфологии поверхности проводилось в режиме амплитудно-частотной модуляции методом постоянной силы. Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Carry 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$. Измерения ВФХ проведены с помощью автоматизированного измерителя иммитанса E7-20 при комнатной температуре. ВФХ измеряли на частотах 100 кГц, 500 кГц и 1 МГц. Измерение ВАХ структур проведено с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса с использованием светоизолирующего бокса и с мультиспектральным источником лазерного излучения (набор лазерных диодов с $\lambda = 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980$ и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и калиброванной мощностью излучения ~ 2 мВт). Все измерения выполнены при комнатной температуре [15]. Электрофизические измерения выполнены поперек структуры

$\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$. InGa-паста использована для формирования омического контакта к Si, верхний контакт обеспечен электрическим зондом измерительной системы.

Результаты и их обсуждение

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что при получении пленок на стеклянной и кремниевой подложках методом высокочастотного лазерного распыления керамической мишени формируется развитая поверхность пленок с большим количеством образований в виде капель цилиндрической и конусообразной формы (рис. 1, 2). Латеральный размер капель на поверхности пленки, осажденной на кремниевой подложке, составляет 0,18-2,5 мкм, высота цилиндрических капель не превышает 200 нм, а конусообразных достигает 600 нм. В результате сканирования области 2х2 мкм выявлено, что пленка состоит из мелкодисперсной фазы, причем латеральный размер мелких структурных элементов варьируется от 10 до 30 нм. Средний перепад высот, определенный в пяти разных точках образца (область сканирования 20х20 мкм), для пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$, полученной на кремниевой подложке, составляет 85 нм при среднеквадратичной шероховатости 58,6 нм.

Методом атомно-силовой микроскопии установлена нанокристаллическая структура тонких пленок $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевой подложке, (рис. 1). Средний перепад высот, определенный в пяти разных точках образца (область сканирования 20х20 мкм), составляет 85 нм при среднеквадратичной шероховатости 58,6 нм.

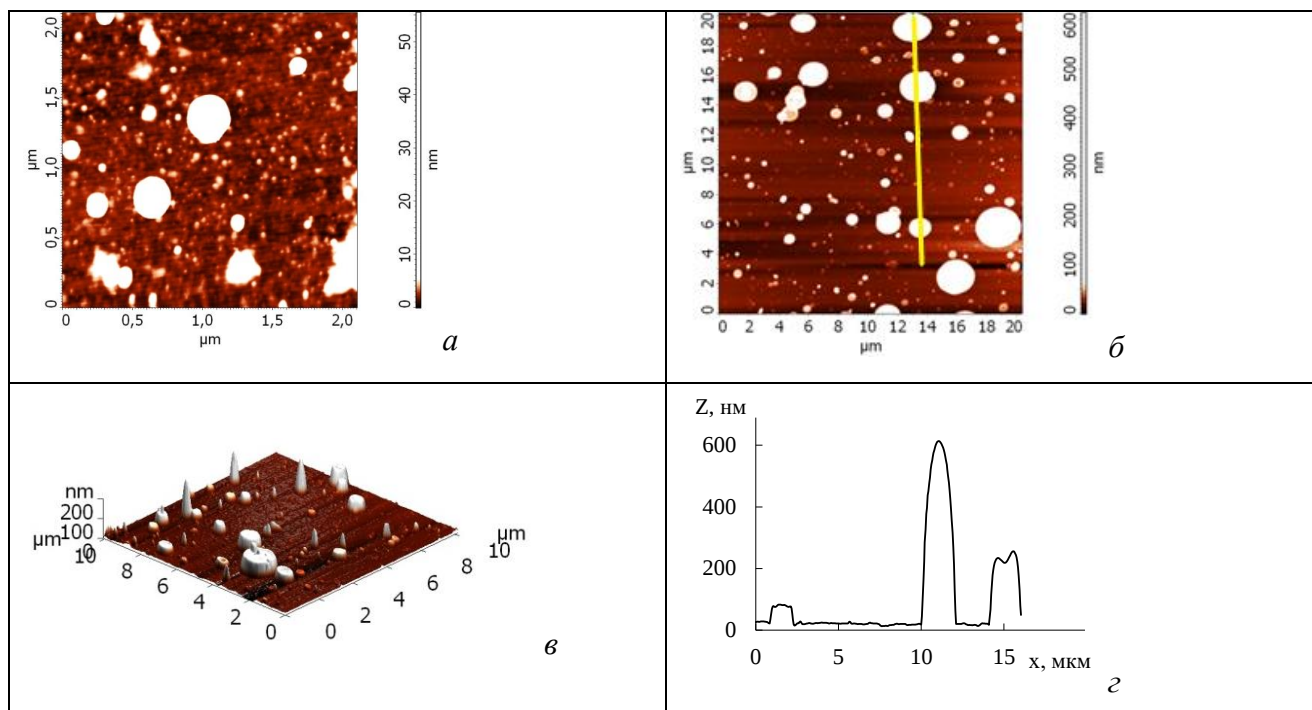


Рис. 1. – АСМ-изображения поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$

на кремниевой подложке (а-в) и профиль сечения рельефа вдоль выделенной линии (г)

Полученная методом высокочастотного лазерного осаждения в вакууме нанокристаллическая структура тонких пленок $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на стеклянной подложке представлена на рис. 2. Морфология поверхности пленок, полученных на стеклянной подложке, практически не отличается от морфологии пленок, осажденных на кремниевую подложку. Данный факт свидетельствует об определяющей роли в формировании структуры режима нанесения пленки, а не типа подложки. Средний перепад высот, определенный в пяти разных точках образца (область сканирования 20x20 мкм), составляет 142 нм при среднеквадратичной шероховатости 55,5 нм. На поверхности пленок наблюдаются крупные частицы высотой до 1,1 мкм и латеральным размером 0,6-5,5 мкм, при этом средний латеральный размер структурных элементов самой пленки варьируется от 10 до 30 нм.

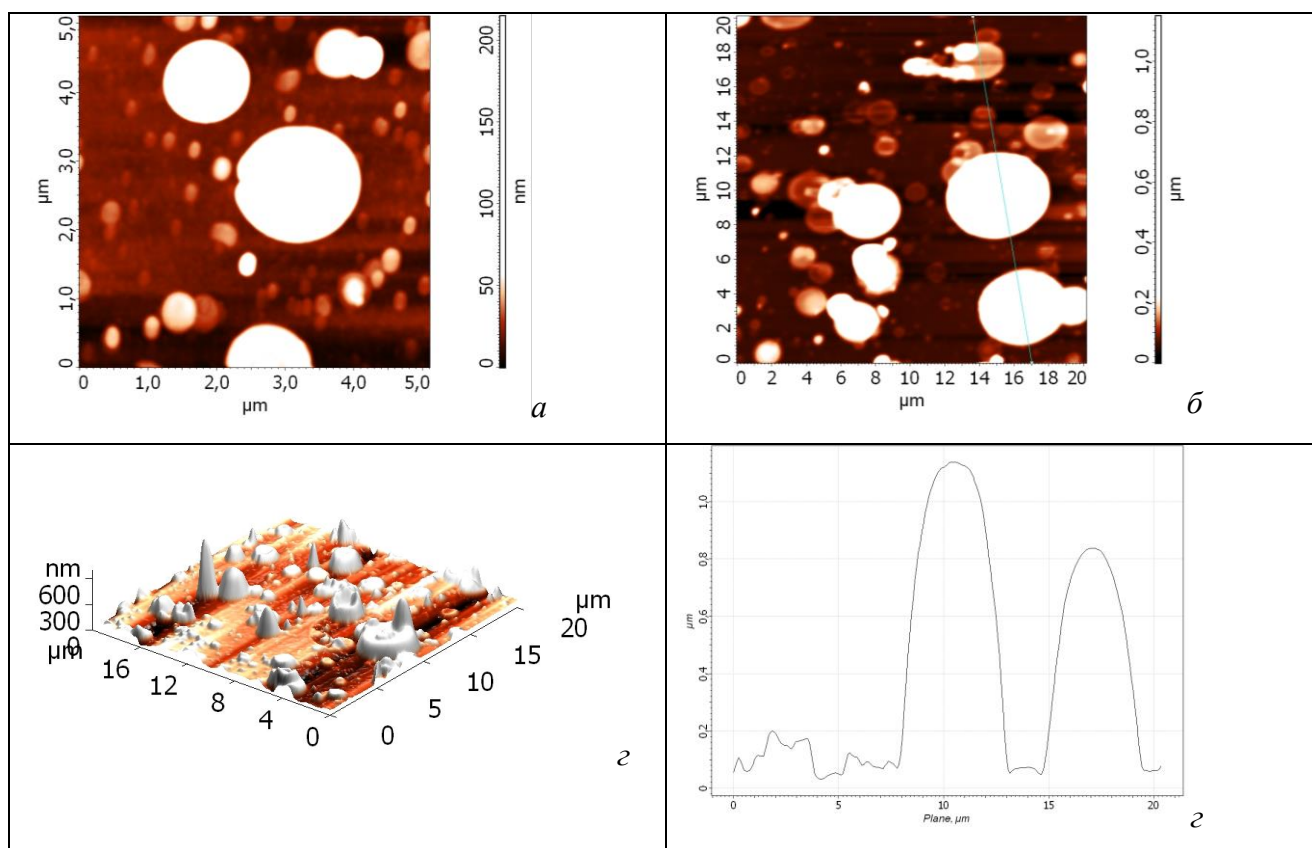


Рис. 2. – АСМ-изображения поверхности лазерно-осажденной тонкой пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на стеклянной подложке (а-в) и профиль сечения рельефа вдоль выделенной линии (г)

Коэффициент пропускания лазерно-осажденной пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на стеклянной подложке в ближней ИК-области (рис. 3, а) возрастает от $T = 28\%$ на $\lambda = 1003$ нм до $T = 61\%$ на $\lambda = 1799$ нм, оставаясь практически неизменным до $T = 59\%$ на $\lambda = 2592$ нм.

Коэффициент пропускания стеклянной подложки во всем указанном спектральном диапазоне практически не изменяется: $T = 89\%$. Исходя из спектра пропускания построен график Тауца и найдена оптическая ширина пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3 \sim 2.75$ эВ [16].

В спектре пропускания кремниевой подложки наблюдаются две полосы поглощения на $\nu = 612\text{ см}^{-1}$ и 1107 см^{-1} с выходом коэффициента пропускания на постоянное значение $T = 43.5\%$ в интервале частот $2843\text{—}6694\text{ см}^{-1}$, что характерно для промышленно выпускаемых кремниевых пластин [17].

В спектре пропускания пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевой подложке в средней ИК-области (рис. 3, б) наблюдаются те же полосы поглощения, что и для кремния, и плавное снижение коэффициента пропускания до $T = 3.5\%$ на частоте $\nu = 3889\text{ см}^{-1}$, обусловленное сильным поглощением ИК-излучения в диапазоне $\lambda = 2.5\text{--}5.0\text{ мкм}$ ($\nu = 4000\text{--}2000\text{ см}^{-1}$) и рассеянием падающего излучения на пленке $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$.

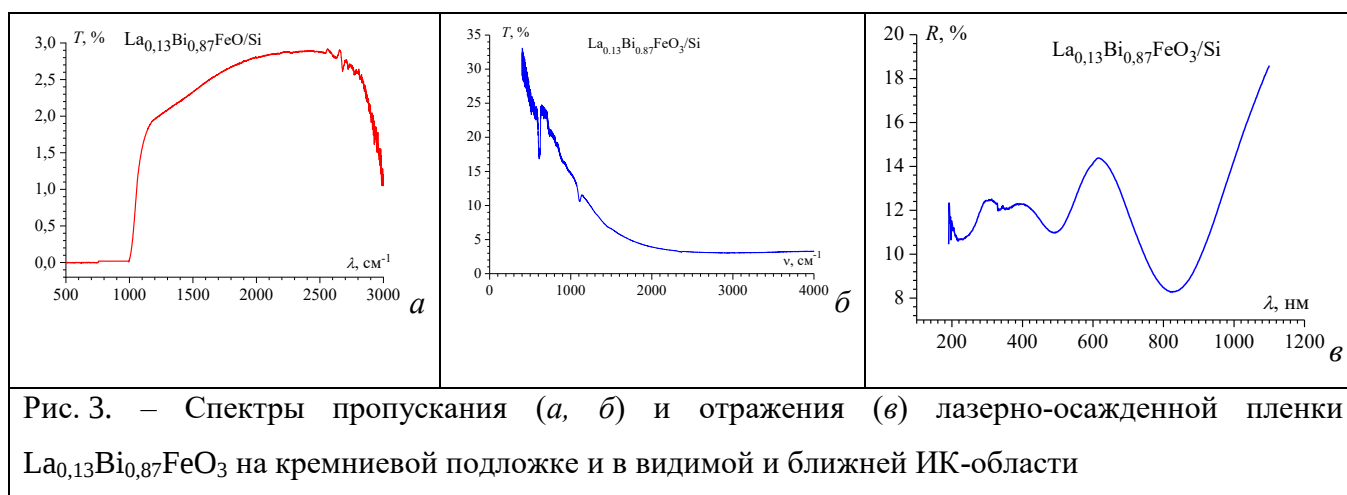


Рис. 3. – Спектры пропускания (а, б) и отражения (в) лазерно-осажденной пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевой подложке и в видимой и ближней ИК-области

В спектре отражения кремниевой подложки наблюдаются два максимума $\lambda = 262.8$ и 360.8 нм и широкая полоса вблизи $\lambda = 434.0\text{ нм}$ ($R = 25\%$) и $\lambda = 1013.0\text{ нм}$ ($R = 28.6\%$), что характерно для монокристаллического кремния и обусловлено его свойствами [17]. В спектре отражения пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевой подложке (рис. 3, в) присутствуют три максимума при 304.2 , 394.6 и 616.8 нм , максимальный коэффициент отражения $R_{\text{макс}} = 18.6\%$ на $\lambda = 1098.0\text{ нм}$. Такая зависимость коэффициента отражения от длины волны может быть обусловлена дисперсией диэлектрической постоянной и коэффициента преломления, а также наличием ионной составляющей связи в сложной кристаллической решетке пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$, и как следствие, возникновение дипольного момента при колебаниях решетки и интенсивное ИК-поглощение (рис. 3, а, б) [18]. Кроме того, в оксидных полупроводниках с аморфной структурой, обладающих высоким удельным электросопротивлением, концентрация свободных носителей заряда мала и их электронный перенос определяется наличием ловушек и глубоко лежащими в запрещенной зоне

донорными центрами. Свойства доноров принципиально отличаются от свойств ловушек, поскольку ловушки не имеют своих электронов, а только захватывают инжектированные из контактов электроны. Наличие неконтролируемых примесей и собственных дефектов кристаллической решетки является причиной механизмов проводимости с участием локальных центров. Высокая концентрация примесных атомов, обуславливающая возможность их взаимодействия, нарушение периодичности кристаллической решетки внедрившимися в нее примесями, флуктуациями распределения примесных центров вызывают размывание дискретных примесных центров с образованием в запрещенной зоне квазинепрерывного спектра локализованных состояний. Поэтому наиболее вероятными механизмами переноса носителей заряда в структуре $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ являются токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ), и ток, обусловленный эффектом Пула—Френкеля [19]. Поскольку измерения ВАХ образцов проводились при комнатной температуре, нами не рассматриваются такие механизмы переноса заряда, как прыжковая проводимость и туннелирование сквозь слой $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$, однако вследствие малой толщины пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ наличие указанных механизмов считаем возможным.

ВАХ полученной структуры имеет вид, характерный для изотипной гетероструктуры. Зонная диаграмма и работа таких гетероструктур описаны в работе [20]. На рис. 4, а представлена ВАХ структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$, построенная в двойных логарифмических координатах, с положительной и отрицательной полярностями напряжения. Полярность приложенного напряжения соответствует напряжению, прикладываемому к пленке $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$. Токи на ВАХ при положительном и отрицательном напряжениях различаются на несколько порядков. Отношение прямого тока к обратному при напряжении 10 В достигает $7 \cdot 10^3$. При положительных напряжениях от 3 до 10 В на темновой ВАХ наблюдается зависимость $I \sim U^n$ с $n = 1.5$.

При отрицательных напряжениях на ВАХ имеются три линейных участка, описываемых зависимостью $I \sim U^n$, и один нелинейный. На линейных участках ВАХ при U до -3 В $n = 0.7$, при U от -3 до -7 В наблюдается рост тока и $n = 1.9$, а при U от -7 до -12 В $n = 5.23$. Показатель степени n , близкий к единице, свидетельствует о наличии омического механизма проводимости. Электроны, захваченные на ловушки, создают объемный заряд, но не участвуют в переносе тока через диэлектрик, поэтому в области слабых полей или малых напряжений, пока инжектированных электронов меньше, чем ловушек, показатель n близок к 2 и наблюдается переход к току, ограниченному пространственным зарядом (ТОПЗ). Рост тока при $n > 4$ указывает на заполнение отдельной группы моноэнергетических уровней прилипания, характерных для инжекционных токов в изоляторе [21]. При напряжениях выше

–12 В наблюдается объемный механизм переноса заряда на основе эффекта Пула—Френкеля, который заключается в понижении кулоновского потенциального барьера при воздействии электрического поля. Поскольку в пленке $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ содержится большое количество ловушек, имеющих барьер кулоновского типа, внешнее электрическое поле посредством эффекта Пула—Френкеля увеличивает вероятность выброса электронов, захваченных на эти ловушки.

Полученные в ходе анализа ВАХ данные свидетельствуют о том, что основным механизмом проводимости является ТОПЗ при наличии моноэнергетических уровней прилипания, связанных со всей совокупностью глубоких центров, и определяется пространственным зарядом, инжектированным в зону проводимости $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ из металлического контакта. В этом случае пленка $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ содержит ловушки, большая часть инжектированного пространственного заряда захватывается ими, в результате чего концентрация свободных носителей заряда становится намного меньше. ВАХ измерены при воздействии лазерного излучения с различными длинами волн, однако фотоэффект в области отрицательных напряжений незначительный, а в области положительных напряжений отсутствует.

На рис. 4, б представлена зависимость сопротивления структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ от напряжения без воздействия оптического лазерного излучения различных длин волн и при его действии. Видно, что во втором случае сопротивление структуры уменьшается в диапазоне U от 0 до –4 В и возрастает в диапазоне U от –4 до –15 В.

Присутствие электронных уровней захвата в запрещенной зоне оксида и на границе раздела $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ ловушек приводит к изменению под действием лазерного излучения. С ростом напряжения под действием лазерного излучения растет концентрация инжектированных и фотогенерированных неосновных носителей заряда и, следовательно, степень заполнения электронами ловушек. Наконец, при напряжении –4 В может быть заполнение подавляющей части ловушек, в связи с этим ток через материал резко возрастает, сопротивление падает и при дальнейшем повышении напряжения ток подчиняется квадратичному закону. При приложении большего напряжения от –4 до –15 В зоны структуры изгибаются настолько, что в процесс проводимости включаются дополнительно ловушки и донорные центры, глубоко лежащие в запрещенной зоне оксида и на границе раздела $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$, и захваченные новые инжектированные электроны и неравновесные носители заряда максимально заполняют все ловушки, не допуская их перемещения электрическим полем. Эти электроны остаются в зоне проводимости, поэтому сопротивление в структуре такое же, как и для оксида без ловушек. Из-за наличия

ловушечных состояний, вызванных примесями и структурными дефектами, и, как следствие, наличия локальных электрических полей, собирающих неосновные носители заряда, межзеренные границы оксида являются областями повышенной рекомбинации. Возможно, при напряжениях вероятность рекомбинационных процессов увеличивается, что в результате приводит к уменьшению тока и росту сопротивления в оксиде. При напряжениях выше -15 В ловушки становятся полностью заполненными и не дают особого вклада в процесс проводимости. Разное сопротивление при воздействии лазерного излучения с различными длинами волн может свидетельствовать о том, что в этом процессе участвуют ловушки с узким энергетическим распределением [21, 22].

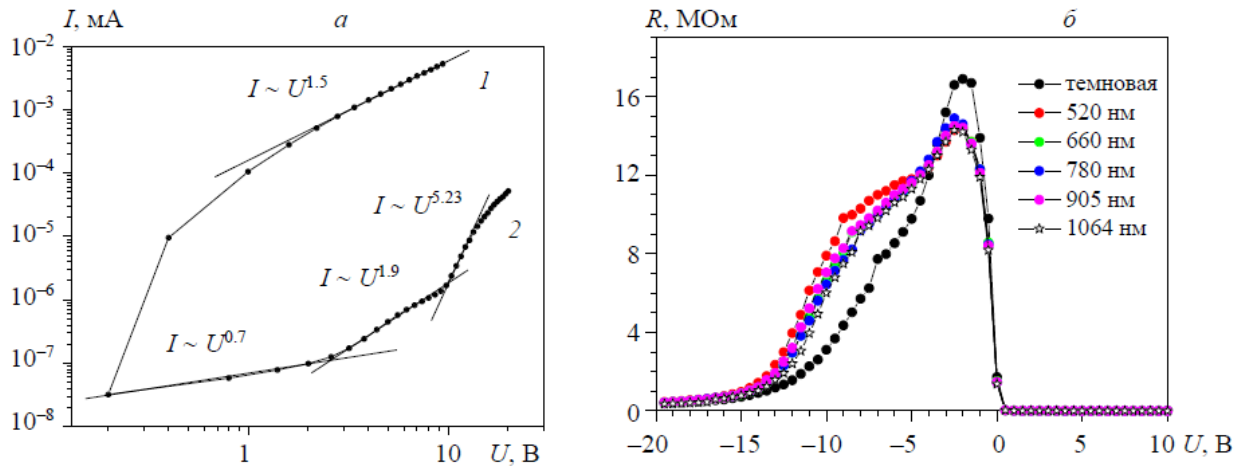


Рис. 4. – Вольт-амперная характеристика в двойных логарифмических координатах с положительной (1) и отрицательной полярностями напряжения (2) (а) и зависимость сопротивления структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ от напряжения без воздействия и под действием оптического лазерного излучения различных длин волн (б)

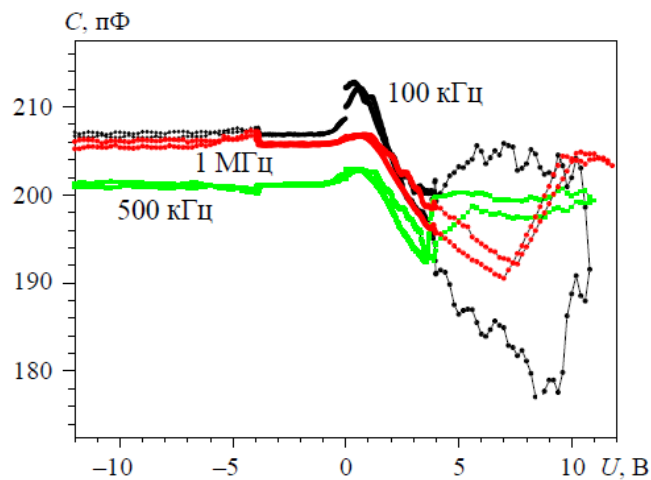


Рис. 5. – Вольт-фарадные характеристики структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ при различных частотах тестового сигнала

Для качественной оценки границы раздела и оксида структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ проведены измерения ВФХ при частоте тестового сигнала от 100 кГц до 1 МГц (рис. 4). ВФХ дают информацию о присутствии электрически активных поверхностных состояний и зарядовом состоянии МОП-структуры. На ВФХ на всех частотах измерения наблюдается ряд особенностей: максимумы при 1 В и гистерезис при напряжениях более +2 В, скачкообразное изменение емкости при 500 кГц (напряжение ~4 В) и 1 МГц (напряжение ~7 В). Отметим, что емкость не сильно зависит от частоты, однако с ростом частоты измерительного сигнала максимум емкости при напряжении 1 В и гистерезис уменьшаются. Данные особенности ВФХ могут быть обусловлены тем, что в слоях $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$

Выводы. Методом высокочастотного лазерного распыления получены нанокристаллические пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевых подложках с определенным в пяти разных точках образца (область сканирования 20×20 мкм) средним перепадом высот, 85 нм при среднеквадратичной шероховатости 58.6 нм, на стеклянных подложках средний перепад высот 142 нм при среднеквадратичной шероховатости 55.5 нм. Коэффициент пропускания лазерно-осажденной пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на стеклянной подложке в ближней ИК-области возрастает от $T = 28\%$ на $\lambda = 1003$ нм до $T = 61\%$ на $\lambda = 1799$ нм. Коэффициент отражения пленки $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3$ на кремниевой подложке достигает максимального значения $R_{\text{макс}} = 18.6\%$ на $\lambda = 1098.0$ нм. В спектре отражения присутствуют три максимума на $\lambda = 304.2$, 394.6 и 616.8 нм. Емкостные и электрические свойства структуры $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ определяются наличием квазинепрерывного спектра локализованных состояний в запрещенной зоне, обусловленных свойствами пленки: нанокристаллическим строением, наличием нескомпенсированных зарядов, сегнетоэлектрических фаз и зарядовых дефектов в пленке. Основными механизмами переноса носителей заряда в структуре $\text{La}_{0,13}\text{Bi}_{0,87}\text{FeO}_3/\text{Si}$ являются токи, ограниченные пространственным зарядом, и ток, обусловленный эффектом Пула—Френкеля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф23МЭ-029).

- [1] M. Fiebig. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38 (2005) R123—R152
- [2] N. A. Hill. *J. Phys. Chem. B*, 104 (2000) 6694—6709
- [3] A. K. Chaudhuri. *Mater. Res. Bull.*, 47, N 4 (2012) 1057—1061
- [4] X. Chen, H. Zhang, K. Ruan, W. Shi. *J. Allow. Compd.*, 529 (2012) 108—112
- [5] V. V. Lazenka, A. F. Makoed Ravinski, I. I. Vanacken, J. G. Zhang, V. V. Moshchalko. *J. Appl. Phys.*, 111 (2012) 123916
- [6] Burcu Ertuğ. *Am. J. Eng. Res. (AJER)*, 2, N 8 (2013) 1—7
- [7] M. A. Ahmed, N. G. Imam, S. I. El-Dek, S. K. El-Mahy. *J. Supercond. and Novel Magn.*, 28, N 8 (2015) 2417—2424
- [8] A. Zaman, A. Ali, M. Anas, M. Kamran, A. Sohail Khan, V. Tirth, J. Y. Al-Humaidi, A. Arabi, M. S. Refat, R. Ullah. *ACS Omega*, 8, N 14 (2023) 13222—13231
- [9] D. M. Smyth. *Solid State Ionics*, 129 (2000) 5—12
- [10] H. Sun, Z. Luo, L. Zhao, C. Liu, C. Ma, Y. Lin, G. Gao, Z. Chen, Z. Bao, X. Jin, Y. Yin, X. Li. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2 (2020) 1081—1089
- [11] Y. M. Sheu, S. A. Trugman, J. Xiong, Y.-S. Park, S. Lee, H. T. Yi, S.-W. Cheong, Q. X. Jia, A. J. Taylor, R. P. Prasankumar. *EPJ Web Conf.*, 41 (2013) 03018
- [12] В. А. Дыбов, Ю. Е. Калинин, А. А. Камынин, М. А. Каширин, В. А. Макагонов, А. Е. Никонов, Д. В. Сериков, А. В. Ситников. *ЖТФ*, 92, № 12 (2022) 1951—1958
- [13] Л. Я. Минько, А. Н. Чумаков, Н. А. Босак. *Квант. электрон.*, 17, № 11 (1990) 1480—1484
- [14] Н. А. Босак, А. Н. Чумаков, А. А. Шевченко, Л. В. Баран, А. Г. Кароза, В. В. Малютина-Бронская, Т. Ф. Райченко, М. Г. Сугак. *Журн. прикл. спектр.*, 87, № 5 (2020) 763—769
- [N. A. Bosak, A. N. Chumakov, A. A. Shevchenok, L. V. Baran, A. G. Karoza, V. V. Malutina-Bronskaya, T. F. Raichenok, M. G. Sugak. *J. Appl. Spectr.*, 87 (2020) 840—845]
- [15] В. В. Малютина-Бронская, В. Б. Залесский, С. А. Сорока, О. В. Ермаков, О. А. Гребенщиков, Т. Р. Леонова. *Сб. матер. 13-й международной научно-технической конференции “Приборостроение-2020”*, Минск, БНТУ (2020) 391
- [16] J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vancu. *Phys. Status Solidi*, 15 (1966) 627—637
- [17] А. Н. Магунов, О. В. Лукин. *Микроэлектроника*, 25, № 2 (1996) 97—111
- [18] О. А. Голикова. *УФН*, 158, № 4 (1989) 581—604
- [19] Л. К. Букина, А. Ю. Кудзин, Г. Х. Соколянский, А. С. Юдин. *ФТТ*, 34, № 2 (1992) 461—465
- [20] A. G. Milnes, D. Feucht. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*, New York City/London, Academic Press (1972)
- [21] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах*, Москва, Мир (1973)

- [22] А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках, Москва, Мир (1977)
- [23] Е. А. Боброва, Н. М. Омеляновская. ФТП, 11, № 42 (2008) 1380—1383
- [24] В. М. Мухортов, Ю. И. Головки, А. В. Павленко, Д. В. Стрюков, С. В. Бирюков, А. П. Ковтун, С. П. Зинченко. ФТТ, 60, № 9 (2018)