

Электрические и оптические свойства тонкопленочного феррита висмута

© В.А. Дыбов, Ю.Е. Калинин, А.А. Камынин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, А.Е. Никонов,
Д.В. Сериков, А.В. Ситников

Воронежский государственный технический университет,
394026 Воронеж, Россия
e-mail: vlad_makagonov@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2022 г.
В окончательной редакции 22 августа 2022 г.
Принято к публикации 9 сентября 2022 г.

Исследованы оптические и электрические свойства тонких пленок феррита висмута, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления в атмосфере аргона и кислорода (80% + 20%). Показано, что для поликристаллических пленок феррита висмута оптическая ширина запрещенной зоны составляет ~ 2.3 eV, что находится в диапазоне значений, приводимых в литературе. Установлено, что для исследованных образцов электрическая проводимость не зависит от напряженности электрического поля до значения $E = 2.1 \cdot 10^6$ V/m. Экспериментальные результаты обсуждаются в рамках модели инжекции носителей заряда из алюминиевого электрода в зону проводимости феррита висмута.

Ключевые слова: электропроводность, сильные электрические поля, коэффициент оптического поглощения, мемристорный эффект.

DOI: 10.21883/JTF.2022.12.53762.182-22

Введение

Применение полупроводниковых и диэлектрических материалов на основе оксидов металлов для нужд оптоэлектроники, силовой электроники, спинтроники и многих других направлений все больше и больше рассматривается в современных фундаментальных и прикладных исследованиях [1]. Интерес к этим материалам обусловлен такими их свойствами, как термическая стабильность при высоких температурах, оптическая прозрачность, возможность управления электрическими, магнитными свойствами и т.д. [2]. Тонкопленочные покрытия из оксидов металлов являются обширной группой наиболее востребованных материалов в современной микро- и нанoeлектронике [3]. В частности, рассматриваются тонкие пленки феррита висмута, который благодаря своим электрическим, оптическим, газочувствительным и другим свойствам относится к одному из популярных мультиферроиков со структурой перовскита [4,5]. Кристаллический феррит висмута BiFeO_3 имеет высокие температуры сегнетоэлектрического ($T_c = 1083$ K) [6] и магнитного ($T_N = 673$ K) [7] упорядочения, т.е. обладает последовательностью фазовых переходов, сопровождающихся магнитоэлектрическими взаимодействиями [8]. Повышенный интерес к ферриту висмута в мировой науке обуславливается, в том числе, перспективами его применения в спинтронике, сенсорной технике, СВЧ-электронике [9,10].

Большинство исследований структуры и физических свойств тонких пленок феррита висмута было проведено на поликристаллических и эпитаксиальных структурах. В частности, в работе [11] было обнаружено, что пленки

феррита висмута с ориентацией (111) эпитаксиально растут на подложках (111) SrTiO_3 . В работе [12] тонкие пленки феррита висмута были нанесены на подложки Pt/Ti/SiO₂/Si(100) при температурах осаждения 350, 400 и 450°C соответственно. Процесс осаждения проводился в системе высокочастотного магнетронного распыления, и в качестве мишени использовалась керамика $\text{Bi}_{1.1}\text{FeO}_3$. Во время осаждения вводилась газовая смесь Ar/O₂ = 4 : 1 с общим давлением, и входная мощность поддерживалась на уровне 80 W.

Проведенные исследования показали, что последовательность фазовых переходов в эпитаксиальных пленках феррита висмута, а также температурные области сосуществования магнитного и поляризационного порядков могут существенно отличаться от наблюдающихся в объемных материалах. Эпитаксиальные пленки феррита висмута были синтезированы на различных подложках и буферных слоях, и, кроме ромбоэдрической фазы, обнаружены весьма разнообразные структурные искажения, не наблюдающиеся в объемном феррите висмута: тетрагональные, орторомбические, моноклинные и триклинные [13].

Многие физические свойства оксидных материалов вообще и величина удельного электрического сопротивления в частности определяются наличием в них кислородных вакансий, что находит применение в структурах, называемых мемристорами [14]. Одним из перспективных типов мемристоров, механизм переключения которых предположительно связан с дрейфом вакансий кислорода, являются мемристоры на основе оксидов с высоким значением диэлектрической проницаемости, поскольку энергия активации прыжкового переноса кис-

лородных вакансий E_m в них относительно небольшая. Например, в случае аморфного феррита висмута величина $E_m \approx 0.8 \text{ eV}$ [15]; для сравнения в Al_2O_3 значение $E_m \approx 6 \text{ eV}$ [16,17]. Относительно подробно механизм резистивного переключения изучен в структурах металл–диэлектрик–металл (МДМ) на основе кристаллического LiNbO_3 [18], в которых также наблюдается небольшая энергия активации $E_m \approx 0.67 \text{ eV}$ [19].

С другой стороны, в оксидных полупроводниках с аморфной структурой, обладающих высокими значениями удельного электросопротивления, концентрация свободных носителей крайне мала и их электроперенос определяется наличием ловушек в запрещенной зоне и глубоко лежащих в ней доноров. Свойства доноров принципиально отличаются от свойств ловушек, поскольку ловушки не имеют своих электронов, а только захватывают инжектированные из контактов электроны. Доноры же имеют свои электроны [20]. В 1938 г. Френкель предложил теоретическое обоснование экспоненциальной зависимости тока от электрического поля для полупроводников с ловушками [21].

С учетом вышесказанного в настоящей работе поставлена цель изучить структуру, ширину запрещенной зоны и удельное электрическое сопротивление тонких пленок феррита висмута, исследовать влияние сильного электрического поля на электропроводность в аморфном состоянии и изучить возможность наблюдения мемристорного эффекта в двухслойных структурах на основе аморфного феррита висмута с разной концентрацией кислорода в слоях.

1. Получение образцов и методика эксперимента

Для получения тонкопленочных образцов феррита висмута использовалась методика высокочастотного магнетронного распыления (ВЧМР) [22]. Метод ВЧМР осуществляли на установке, созданной на базе промышленного вакуумного напылительного поста УВН-74, модернизированного планарным магнетроном с размерами катода $70 \times 300 \text{ mm}$ и возможностью изменения размеров магнитной системы от 45×45 до $45 \times 250 \text{ mm}$. Для подачи на катод магнетрона переменного напряжения был установлен генераторный блок УВ-1 ГУ — высокой частоты 13.56 MHz и блока согласования. Максимальная мощность ВЧ генератора — 1000 W . Для подачи напряжения на катод ионного источника был установлен блок питания типа БП-94.

Рабочий газ магнетрона — аргон (99.998%) и кислород (99.98%). В процессе работы происходила непрерывная смена рабочего газа в камере за счет напуска через дозирующий вентиль и откачки диффузионным насосом. Предварительно вакуумную камеру откачивали до давления не выше $1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. При эксплуатации магнетрона использовали следующие режимы распыления: давление

аргона в камере $1 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$, удельная мощность ВЧ разряда 50 W . В качестве мишени использовали керамику BiFeO_3 . Тонкие пленки феррита висмута получали путем высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени в среде Ar (80%) + O_2 (20%). В процессе напыления в камеру подавался непрерывный поток аргона и кислорода, а скорость их потока регулировалась в соотношении 4 : 1. Подложка в процессе напыления не нагревалась. Температура подложки контролировалась термопарой хромель–алюмель, и ее значение не превышало 150°C . В качестве подложек использовали пластины окисленного монокристаллического кремния толщиной $150 \mu\text{m}$ (толщина окисла 200 nm) для изучения структуры и электрических свойств, а также предметные стекла для исследования оптических свойств. Толщина полученных пленок была измерена на интерферометре МИИ-4 и составляла 500 nm для образцов на кремнии и $1 \mu\text{m}$ для образцов на стекле. Термообработку аморфных пленок осуществляли в муфельной печи на воздухе при 550°C . Скорость нагрева и охлаждения составила 5 градусов в минуту, время выдержки при температуре отжига — 60 min .

Для аттестации полученных образцов использовалась методика рентгенофазового анализа (РФА) с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D2 Phaser.

Для изучения влияния сильного электрического поля на проводимость тонких пленок феррита висмута и мемристорных структур на их основе были синтезированы структуры, представляющие собой МДМ структуры с контактами из алюминия размерами $0.4 \times 0.2 \text{ mm}$.

При измерении электрических свойств синтезированных структур в сильных электрических полях была использована автоматизированная установка на базе источника программируемого питания MOTESN. Процесс измерения и сбор экспериментальных данных осуществлялся в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, разработанного с использованием среды LabVIEW [23].

Для исследования оптических свойств и характеристик зонной структуры оксидных полупроводников и структур на их основе активно применяют оптические методы измерения. Самым распространенным видом оптических исследований является измерение оптического коэффициента пропускания. Измерения полученных на подложках из стекла образцов тонкопленочного феррита висмута были проведены при помощи спектрофотометра ECOVIEW УФ-6100С, предназначенного для исследования оптического коэффициента пропускания жидких и твердых образцов в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Оптическая схема двухлучевая с полосой пропускания 1.8 nm . Спектральный диапазон измерений $190\text{--}1100 \text{ nm}$. Диапазон измерений оптического коэффициента пропускания $0.1\text{--}100.0\%$. Погрешность измерений оптических величин составляет $\pm 0.3\%T$ (T — оптическое пропускание). Повторяемость оптических измерений находится в пределах — 0.2% .

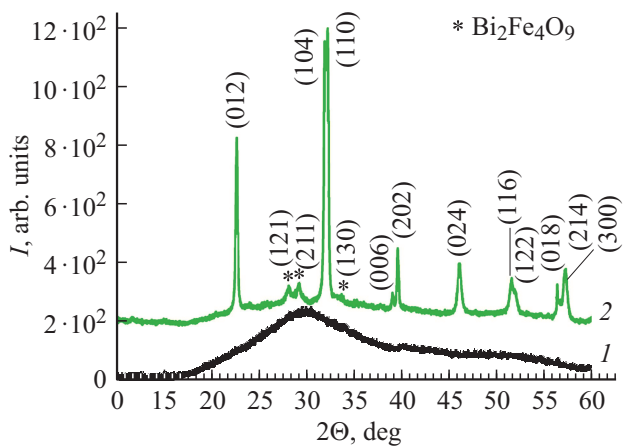


Рис. 1. Рентгенограммы пленки BiFeO_3 на подложке из кремния в исходном состоянии (кривая 1) и после термообработки на воздухе при 550°C в течение 60 min (кривая 2). Знаком (*) обозначена примесная фаза $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

2.1. Структура тонких пленок феррита висмута

На рис. 1 представлены результаты рентгеновской дифракции синтезированных пленок феррита висмута на кремнии. В исходном состоянии синтезированный образец имеет рентгеноаморфную структуру, что выражается в наличии широкого гало при угле $2\theta \approx 29^\circ$ (кривая 1 на рис. 1).

После термообработки на воздухе при 550°C пленка феррита висмута кристаллизуется, и на дифрактограмме наблюдается серия дифракционных максимумов (кривая 2 на рис. 1). Анализ полученной рентгенограммы показал, что присутствующие на ней высокоинтенсивные рефлексы соответствуют ромбоэдрической фазе BiFeO_3 с параметрами ячейки $a = 5.552 \text{ \AA}$, $c = 13.805 \text{ \AA}$. Размер кристаллитов BiFeO_3 , полученный на основе оценок по методу Шерера, составил 127 nm . Также присутствует некоторое количество вторичной фазы $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, содержание которой в пленке не превышает 2%. Наличие этой фазы обусловлено неустойчивостью фазы BiFeO_3 как при синтезе, так и при последующей термообработке [24,25].

2.2. Оптические свойства тонких пленок феррита висмута

Для исследования оптических свойств и определения ширины запрещенной зоны тонких пленок феррита висмута были измерены спектры пропускания света образцов, осажденных на стеклянные подложки. Измерения проводили в диапазоне длин волн от 300 до 1100 nm при комнатной температуре.

Спектры оптического пропускания исследованных в работе пленок показаны на рис. 2. Как видно из рисунка,

полученные пленки являются прозрачными в диапазоне длин волн от 550 до 1100 nm. Резкое уменьшение пропускания в области длин волн менее 550 nm связано с фундаментальным поглощением.

В общем случае край фундаментального поглощения может быть описан формулой Тауца [26]:

$$ahv = a \cdot (hv - E_g)^n, \quad (1)$$

где $\alpha = -\ln T/d$ — коэффициент поглощения (T — оптическое пропускание, d — толщина пленки), $h\nu$ — энергия фотонов, E_g — оптическая ширина запрещенной зоны, A — константа, зависящая от эффективных масс электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, n — определяет тип электронного или оптического перехода и принимает значения 1/2, 2, 3/2 или 3. Если

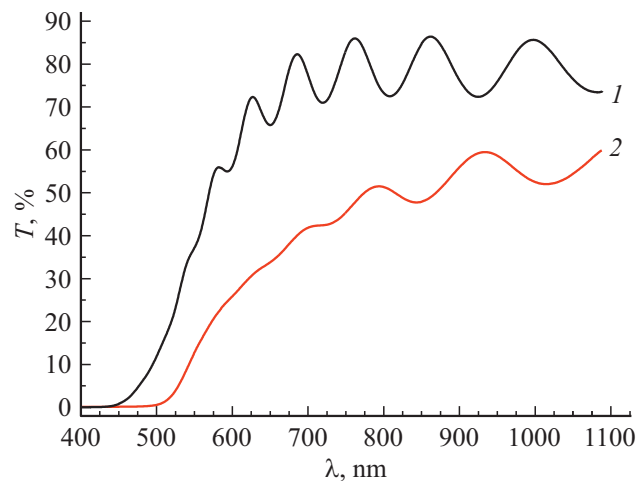


Рис. 2. Спектры оптического пропускания пленки феррита висмута толщиной $1 \mu\text{m}$ в исходном состоянии (1) и после термообработки при $T = 550^\circ\text{C}$ в течение 60 min (2).

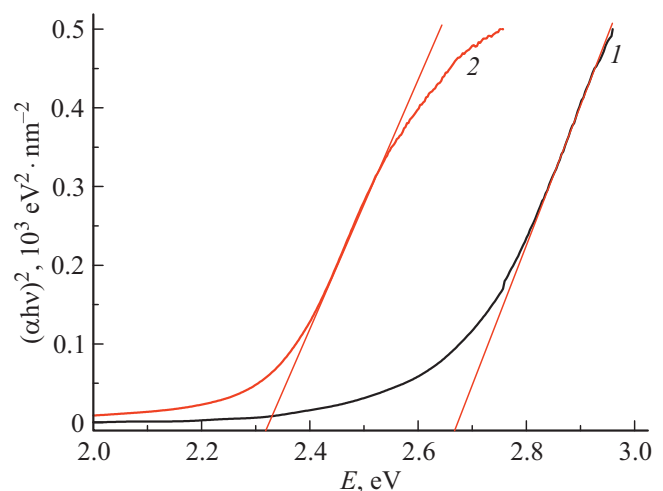


Рис. 3. Зависимости коэффициента оптического поглощения α от энергии падающих фотонов E , представленные в координатах $(\alpha hv)^2 \propto E$ и измеренные для пленок феррита висмута толщиной $1 \mu\text{m}$ в исходном состоянии (1) и после термообработки при $T = 550^\circ\text{C}$ в течение 60 min (2).

$n = 1/2$, то переход является прямым разрешенным, $n = 3/2$ — прямым запрещенным, $n = 2$ — непрямым разрешенным переходом и при $n = 3$ — непрямым запрещенным [26]. Обычно вклад разрешенных переходов преобладает в процессах поглощения, давая либо $n = 1/2$ для прямых, либо $n = 2$ для непрямых переходов.

Для установления оптической ширины запрещенной зоны исследованных пленок экспериментальные спектры оптического пропускания были перестроены в координатах $\alpha^2 = hv$, $\alpha^{1/2} = hv$, и установлено, что исследованные тонкие пленки относятся к прямозонным полупроводникам. Из спектральной зависимости коэффициента поглощения, удовлетворяющего прямозонному полупроводнику, линейной экстраполяцией зависимости $(\alpha hv)^2$ от энергии фотона hv к значению $\alpha = 0$ в области края фундаментального поглощения была определена оптическая ширина запрещенной зоны E_g^{opt} (рис. 3). Оценки показали, что для пленок феррита висмута, полученных в атмосфере аргона и кислорода в исходном состоянии, оптическая ширина запрещенной зоны составляет около 2.7 eV, а после термообработки на воздухе при 550°C в течение 60 min — около 2.3 eV, что находится в диапазоне значений, приводимых в литературе для оксидных перовскитов на основе BiFeO_3 [27,28].

Для расчета среднего (в исследованном диапазоне длин волн) значения коэффициента преломления n воспользуемся формулой, вытекающей из условия наблюдения интерференции при условии нормального падения света [29,30]:

$$n = \frac{m}{2d \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}, \quad (2)$$

где d — толщина исследуемой пленки, λ_1 и λ_2 — длины волн, соответствующие выбранным максимумам, m — целое число при условии, если берутся два соседних максимума. Оценки среднего коэффициента оптического преломления дали значения $n = 3.22$ для пленок в аморфном состоянии и $n = 2.64$ для пленок феррита висмута после термообработки. Отметим, что полученные значения n находятся в диапазоне значений, приводимых в литературе для поликристаллических тонких пленок BiFeO_3 [31,32].

2.3. Влияние сильного электрического поля на проводимость тонких пленок феррита висмута

2.3.1. Проводимость тонкопленочного феррита висмута в сильных полях

Предварительные результаты исследования электрических свойств тонких пленок феррита висмута показали, что последние обладают высоким электрическим сопротивлением, поэтому были синтезированы тонкопленочные образцы для исследований в перпендикулярной геометрии и изучено влияние сильного электрического

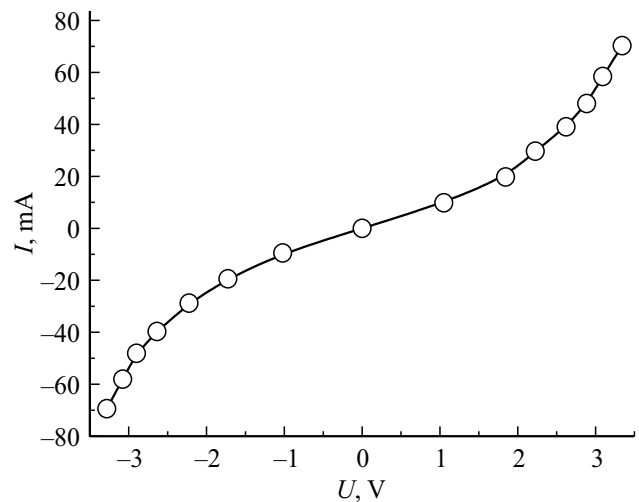


Рис. 4. ВАХ тонкой пленки феррита висмута толщиной 500 nm в исходном состоянии.

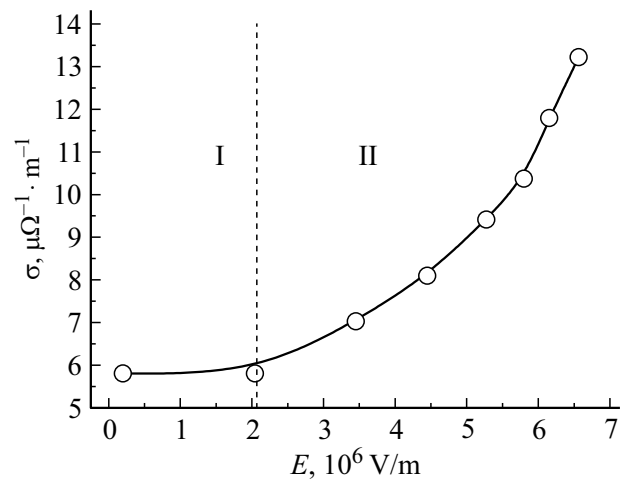


Рис. 5. Зависимости электрической проводимости от величины напряженности внешнего электрического поля тонкопленочного феррита висмута в исходном состоянии.

поля на их проводимость. На рис. 4 представлена вольт-амперная характеристики (ВАХ) исследуемого феррита висмута толщиной 500 nm.

ВАХ пленок тонкопленочного феррита висмута является симметричной относительно нуля и нелинейной. Зависимости, измеренные при увеличении и уменьшении электрического поля, совпадают. Для анализа полученных зависимостей была выбрана положительная ветвь ВАХ (первый квадрант), из которой были рассчитаны значения удельной электрической проводимости. Зависимости проводимости от напряженности электрического поля для исследованных пленок, представленные на рис. 5, можно условно разделить на два участка.

Первый участок I соответствует линейному изменению тока с увеличением напряженности электрического поля до значений $E = 2.1 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ — омический уча-

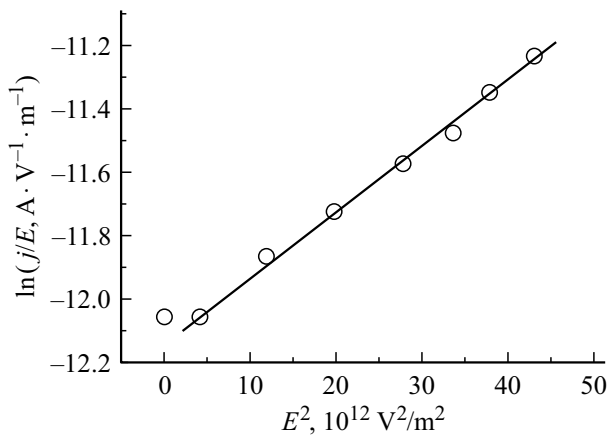


Рис. 6. ВАХ тонкой пленки феррита висмута, перестроенная в координатах, соответствующих модели инжекции носителей заряда из алюминия в феррит висмута по механизму термически облегченного туннелирования.

сток, на котором электрическая проводимость не зависит от величины напряженности электрического поля. Значение удельной электрической проводимости, определенное по участку омической проводимости, составило $5.8 \mu\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Второй участок II характеризуется ярко выраженной нелинейной зависимостью удельной электрической проводимости от поля, и проводимость начинает нелинейно возрастать при $E > 2.1 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

В предельных случаях проводимость может ограничиваться инжекцией носителей на контакте или переносом по ловушкам в объеме. Такое разделение часто является условным, в зависимости от того, как сильно пространственный заряд, накопленный на ловушках, экранирует электрическое поле на контакте. В качестве ловушек при этом выступают кислородные вакансии, которые в исходном состоянии не заполнены электронами и дырками. Анализ влияния напряженности электрического поля на проводимость тонкопленочного феррита висмута в рамках переноса, ограниченного объемом диэлектрика, проводили согласно моделям ионизации ловушек по Френкелю [21] и прыжковой электропроводности по ловушкам в условиях сильного электрического поля [33]. Анализ показал, что экспериментальные результаты не могут быть хорошо описаны в рамках ни одной из обозначенных моделей переноса по объему диэлектрика.

На контакте обычно рассматриваются три механизма инжекции: эффект Фаулера–Нордгейма, термически облегченное туннелирование и термоэлектронная эмиссия Шотки [20]. Для анализа экспериментальных результатов на предмет соответствия этим предполагаемым механизмам, представленные на рис. 4 ВАХ исследованных образцов перестраивались в координатах, соответствующих механизмам Фаулера–Нордгейма $\ln(j/E^2) \propto f(1/E)$, термически облегченного туннелирования $\ln(j/E) \propto f(E^2)$ и эффекта Шотки $\ln(j) \propto f(\sqrt{E})$, где j — плотность тока.

Для пленок феррита висмута получим наилучшую линейаризацию экспериментальной кривой в координатах, соответствующих механизму термически облегченного туннелирования (рис. 6).

Для пленок феррита висмута при напряженности электрического поля от $E = 2.1 \cdot 10^6$ до $6.6 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ линейный участок на экспериментальных кривых в координатах $\ln(j/E) \propto E^2$ указывает на доминирующую роль механизма термически облегченного туннелирования в электропереносе исследованных образцов.

Таким образом, в синтезированных тонких пленках феррита висмута проводимость в области сильных электрических полей определяется инжекцией носителей заряда из контакта в объем и переносом заряда в объеме пленки.

2.3.2. Мемристорные свойства структур на основе тонкопленочного феррита висмута

Чаще всего мемристорная ячейка на основе оксида металла представляет собой структуру МДМ, в которой в материале диэлектрика создается градиент стехиометрии по кислороду [34]. Для получения градиента по содержанию кислорода по толщине слоя диэлектрика проводили последовательное напыление в среде аргона (11 min, $P_{\text{Ar}} = 1.2 \text{ Pa}$) и среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ (22 min, $P_{\text{Ar}+\text{O}_2} = 1.2 \text{ Pa}$) при мощности магнетрона 50 W. Таким образом, толщина слоя BiFeO_3 , обедненного кислородом, составила 20 nm, а толщина обогащенного слоя — 40 nm. Размеры контактов из алюминия так же, как и при исследовании влияния сильного поля на электропроводность тонкой пленки феррита висмута, составили $0.4 \times 0.2 \text{ mm}^2$.

На рис. 7 представлена ВАХ синтезированной структуры на основе феррита висмута при комнатной температуре. Из приведенной зависимости видно, что при напряжении $\sim -(2-4) \text{ V}$ ток через структуру резко

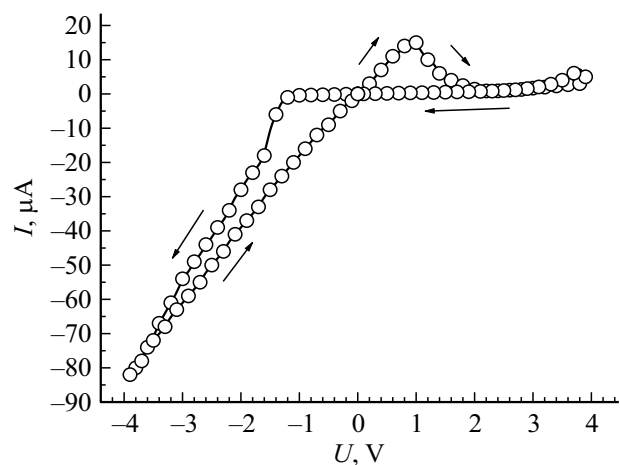


Рис. 7. ВАХ синтезированной двухслойной структуры на основе феррита висмута толщиной 60 nm при комнатной температуре.

возрастает, что соответствует уменьшению электрического сопротивления образца, т.е. переходу в „низкоомное“ состояние (LRS). При уменьшении напряжения от -4 до $+1$ В ВАХ структуры является практически линейной, что говорит о постоянстве электрического сопротивления пленки. При напряжении, большем $+1$ В, электрический ток через пленку резко уменьшается, что указывает на рост электрического сопротивления образца и переключение структуры в „высокоомное“ состояние (HRS).

Оценки сопротивления полученной структуры при напряжении $+0.2$ В (напряжение считывания) дают значения ≈ 67 к Ω для LRS-состояния и ≈ 3 М Ω для HRS-состояния. Таким образом, при переходе из LRS- в HRS-состояние и обратно сопротивление полученной структуры изменяется чуть менее чем в 50 раз. Рассмотренный пример сформированной ВАХ показывает, что синтезированная структура на основе феррита висмута может обладать хорошими мемристорными свойствами.

Обсудим полученные результаты. К настоящему времени накоплен довольно богатый экспериментальный материал, содержащий в том числе и доказательную базу ключевой роли вакансий (ионов) кислорода в резистивном переключении многих объектов на основе оксидов металлов. При этом практически во всех случаях отмечается, что переключение происходит при достижении критического поля ($\sim 10^5$ В·см $^{-1}$) за очень короткие времена. Одним из возможных механизмов переключения предлагается образование проводящего канала, обеспечивающего низкоомное состояние мемристора [35]. Однако относительно механизма образования самого проводящего канала возникают различные мнения: одни авторы связывают переключение с чисто тепловым эффектом [36,37], другие — с электронным процессом, аналогичным процессу двойной инжекции [38].

Для исследованной структуры данный процесс можно связать с электронным процессом, при котором между электродами в двухслойном феррите висмута образуется сильное электрическое поле. Как показано в предыдущем разделе, в однослойной структуре феррита висмута доминирует процесс термически облегченного туннелирования на контакте, при котором на первом этапе носители заряда (электроны) возбуждаются до некоторой энергии за счет поглощения фононов, на втором — туннелируют в свободную зону феррита висмута. При этом процесс переноса заряда в двухслойной структуре с разной концентрацией ловушек (кислородных вакансий) будет зависеть от полярности приложенного электрического поля. Если приложить отрицательный потенциал к верхнему электроду, расположенному на слое феррита висмута, который синтезирован в атмосфере аргона и содержит более высокую концентрацию кислородных вакансий, то инжекция носителей заряда в высокоомный слой может идти через ловушки, содержащиеся в низкоомном слое. Формирование проводящих каналов в нижнем (высокоомном) слое, который синтезирован в атмосфере аргона + кислорода и содержит более низкую

концентрацию кислородных вакансий, отражается отрицательной ветвью ВАХ (рис. 7).

Если же приложить положительный потенциал к верхнему электроду, то при малых напряженностях электрического поля проводимость будет осуществляться за счет носителей заряда, находящихся на ловушках. При достижении критического значения, соответствующего переходу в сильное поле, уже на нижнем электроде за счет термически облегченного туннелирования инжектируются носители заряда, которые проводят электрический ток через ловушки. При этом вследствие приложения сильного электрического поля отрицательно заряженные ионы кислорода получают направленный дрейф к положительному электроду, начинают скапливаться на нем, создавая пространственный заряд, экранирующий электрическое поле на контакте. Этот процесс сопровождается резким спадом электрического тока и отражается положительной ветвью ВАХ (рис. 7).

В заключение отметим, что мемристоры, работающие на предложенном в настоящей работе механизме переключения, должны обладать более воспроизводимыми параметрами, нежели мемристоры, у которых процесс переключения основан на формировании филаментов из кислородных вакансий, по которым осуществляется перенос заряда [39].

Следовательно, процессы переключения в исследованных структурах феррита висмута можно связать с процессами инжекции носителей заряда в высокоомный слой через ловушки, содержащиеся в низкоомном слое (при отрицательном потенциале на электроде), и образованием пространственного заряда, экранирующего электрическое поле на контакте (при положительном потенциале). Дальнейшие исследования мемристивных свойств в исследованных в данном разделе структурах и на других оксидах позволят более детально установить механизм резистивного переключения в мемристорах подобного типа.

Заключение

1. Методом ВЧМР синтезированы тонкие пленки феррита висмута толщиной 500 нм на подложках из окисленного кремния и 1 μ м на подложках из стекла. Полученные в работе пленки феррита висмута имеют аморфную структуру и кристаллизующуюся при температуре 550°С. Исследования оптических свойств синтезированных пленок показали, что для пленок феррита висмута в исходном состоянии оптическая ширина запрещенной зоны составляет около 2.7 eV а для термообработанных на воздухе при 550°С в течение 60 min — около 2.3 eV, что находится в диапазоне значений, приводимых в литературе для оксидов перовскитов.

2. Исследованы ВАХ синтезированных пленок и установлено, что электрическая проводимость не зависит от напряженности электрического поля до значения $E = 2.1 \cdot 10^6$ В/м, определяется инжекцией носителей

заряда из контакта в объем и переносом заряда в объеме материала.

3. Установлено, что ВАХ двухслойных МДМ структур, состоящих из обедненного и обогащенного кислородом слоев толщиной 20 и 40 нм соответственно, характеризуются нелинейностью и гистерезисом, характерными для эффекта резистивного переключения. При переходе из LRS- в HRS-состояние и обратно сопротивление полученной структуры изменяется чуть менее чем в 50 раз. Процессы переключения в исследованных структурах связываются с инжекцией носителей заряда в высокоомный слой через ловушки, содержащиеся в низкоомном слое (при отрицательном потенциале на электроде), и образованием пространственного заряда, экранирующего электрическое поле на контакте при положительном потенциале.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2020-007) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037 (проведение контрольных измерений).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G.J. Exarhos, X.D. Zhou. *Thin Solid Films*, **515** (18), 7025 (2007). DOI: 10.1016/j.tsf.2007.03.014
- [2] E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D.C. Paine. *MRS Bulletin*, **32** (3), 242 (2007). DOI: 10.1557/mrs2007.29
- [3] S.J. Lee, C.S. Hwang, J.E. Pi, J.H. Yang, C.W. Byun, H.Y. Chu, K.I. Cho, S.H. Cho. *Etri J.*, **37** (6), 1135 (2015). DOI: 10.4218/etrij.15.0114.0743
- [4] M.D. Rossell, R. Erni, M.P. Prange, J.C. Idrobo, W. Luo, R.J. Zeches, S.T. Pantelides, R. Ramesh. *Phys. Rev. Lett.*, **108** (4), 047601 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.047601
- [5] О.Б. Романова, В.В. Кретинин, С.С. Аплеснин, М.Н. Ситников, Л.В. Удод, К.И. Янушкевич. *ФТТ*, **63** (6), 721 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.06.50928.015
[О.В. Романова, В.В. Кретинин, С.С. Аплеснин, М.Н. Ситников, Л.В. Удод, К.И. Янушкевич. *Phys. Solid State*, **63** (6), 897 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421060184]
- [6] J.R. Teague, R. Gerson, W.J. James. *Solid State Commun.*, **8** (13), 1073 (1970). DOI: 10.1016/0038-1098(70)90262-0
- [7] Y.H. Chu, L.W. Martin, M.B. Holcomb, M. Gajek, S. Han, Q. He, N. Balke, C.-H. Yang, D. Lee, W. Hu, Q. Zhan, P.-L. Yang, A. Fraile-Rodríguez, A. Scholl, S.X. Wang, R. Ramesh. *Nature Mater.*, **7**, 478 (2008). DOI: 10.1038/nmat2184
- [8] P. Fischer, M. Polomska, I. Sosnowska, M. Szymanski. *J. Phys C: Solid State Phys.*, **13** (10), 1931 (1980). DOI: 10.1088/0022-3719/13/10/012
- [9] F. Scott. *J. Mater. Chem.*, **22**, 4567 (2012). DOI: 10.1039/C2JM16137K
- [10] А.П. Пятаков, А.К. Звездин. *УФН*, **182**, 593 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206b.0593
[А.П. Пятаков, А.К. Звездин. *Phys.-Usp.*, **55** (6), 557 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201206b.0593]
- [11] J.F. Li, J.L. Wang, M. Wuttig, R. Ramesh, N. Wang, B. Ruetter, A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin, D. Viehland. *Appl. Phys. Lett.*, **84** (25), 5261 (2004). DOI: 10.1063/1.1764944
- [12] S.R. Jian, H.W. Chang, Y.C. Tseng, P.H. Chen, J.Y. Juang. *Nanoscale Res. Lett.*, **8**, 297 (2013). DOI: 10.1186/1556-276X-8-297
- [13] D. Sando, A. Barthélémy, M. Bibes. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **26** (47), 473201 (2014). DOI: 10.1088/0953-8984/26/47/473201
- [14] *Resistive Switching: From Fundamentals of Nanoionic Redox Processes to Memristive Device Applications*. ed. by D. Ielmini, R. Waser (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2016)
- [15] S.A. Gridnev, Yu.E. Kalinin, V.A. Dybov, I.I. Popov, M.A. Kashirin, N.A. Tolstykh. *J. Alloys Compd.*, **918**, 165610 (2022). DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.165610
- [16] R.A. De Souza, V. Metlenko, D. Park, T.E. Weirich. *Phys. Rev. B*, **85** (17), 174109 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.174109
- [17] J.D. Cawley, W. John, A.R. Cooper. *J. Am. Ceram. Soc.*, **74** (9), 2086 (1991). DOI: 10.1111/j.1151-2916.1991.tb08264.x
- [18] X. Pan, Y. Shuai, C. Wu, W. Luo, X. Sun, H. Zeng, S. Zhou, R. Böttger, X. Ou, T. Mikołajick, W. Zhang, H. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.*, **108** (3), 032904 (2016). DOI: 10.1063/1.4940372
- [19] C. Wang, J. Sun, W. Ni, B. Yue, F. Hong, H. Liu, Z. Cheng. *J. Am. Ceram. Soc.*, **102** (11), 6705 (2019). DOI: 10.1111/jace.16522
- [20] К.А. Насыров, В.А. Гриценко. *УФН*, **183** (10), 1099 (2013). DOI: 10.3367/UFNr.0183.201310h.1099 [К.А. Насыров, В.А. Гриценко. *Phys.-Usp.*, **56** (10) 999 (2013).]
- [21] J.I. Frenkel. *Phys. Rev.*, **54**, 647 (1938). DOI: 10.1103/PhysRev.54.647
- [22] M. Sumets, V. Ievlev, V. Dybov, A. Kostyuchenko, D. Serikov, S. Kannykin, E. Belonogov. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **30** (17), 16562 (2019). DOI: 10.1007/s10854-019-02033-1
- [23] Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.В. Рыльков, К.Г. Королев, Г.С. Рыжкова. *Вестник ВГТУ*, **12** (6), 4 (2016).
- [24] S.M. Selbach, M.A. Einarsrud, T. Grande. *Chem. Mater.*, **21** (1), 169 (2009). DOI: 10.1021/cm802607p
- [25] N. Wang, X. Luo, L. Han, Z. Zhang, R. Zhang, H. Olin, Y. Yang. *Nano-Micro Lett.*, **12**, 81 (2020). DOI: 10.1007/s40820-020-00420-6
- [26] B.D. Viezbicke, S. Patel, B.E. Davis, D.P. Birnie. *Phys. Stat. Sol. B*, **252**, 1700 (2015). DOI: 10.1002/pssb.201552007
- [27] D. Sando, C. Carrétéro, M.N. Grisolia, A. Barthélémy, V. Nagarajan, M. Bibes. *Adv. Opt. Mater.*, **6** (2), 1700836 (2017). DOI: 10.1002/adom.201700836
- [28] P. Machado, I. Cañ o, C. Menéndez, C. Cazorla, H. Tan, I. Fina, M. Campoy-Quiles, C. Escudero, M. Tallarida, M. Coll. *J. Mater. Chem. C*, **9** (1), 330 (2021). DOI: 10.1039/d0tc04304d

- [29] F. Carreño, J.C. MartínezAntón, E. Bernabeu. *Rev. Sci. Instrum.*, **65** (8), 2489 (1994). DOI: 10.1063/1.1144707
- [30] A.R. Ansari, A.H. Hammad, M.Sh. Abdel-wahab, M. Shariq, M. Imran. *Opt. Quant. Electron.*, **52**, 426 (2020). DOI: 10.1007/s11082-020-02535-x
- [31] D.J. Huang, H.M. Deng, F. Chen, H. Deng, P.X. Yang, J.H. Chu. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **276**, 012168 (2011). DOI: 10.1088/1742-6596/276/1/012168
- [32] H. Shima, H. Naganuma, S. Okamura. in *Materials Science — Advanced Topics* (IntechOpen London, United Kingdom, 2013), DOI: 10.5772/54908 DOI: 10.5772/54908 p. 33
- [33] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2 т.* (Мир, М., 1982) [N. Mott, E. Davis *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (Clarendon Press, Oxford, 1979)]
- [34] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams. *Nature*, **53**, 80 (2008). DOI: 10.1038/nature06932
- [35] D.H. Kwon, K.M. Kim, J.H. Jang, J.M. Jeon, M.H. Lee, G.H. Kim, X.S. Li, G.S. Park, B. Lee, S. Han, M. Kim, C.S. Hwang. *Nat. Nanotechnol.*, **5** (2), 148, (2010). DOI: 10.1038/nnano.2009.456
- [36] W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig, E. Ma. *Nat. Rev. Mater.*, **4**, 150 (2019). DOI: 10.1038/s41578-018-0076-x
- [37] Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, **46** (5), 577 (2012). [N.A. Bogoslovskiy, K.D. Tsendin. *Semiconductors*, **46** (5), 559 (2012). DOI: 10.1134/S1063782612050065]
- [38] L.O. Chua. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, **18** (5), 507 (1971). DOI: 10.1109/TCT.1971.1083337
- [39] A. Mehonic, A.L. Shluger, D. Gao, I. Valov, E. Miranda, D. Ielmini, A. Bricalli, E. Ambrosi, C. Li, J.J. Yang, Q. Xia, A.J. Kenyon. *Adv. Mater.*, **30** (43), 1801187 (2018). DOI: 10.1002/adma.201801187