

## Электропроводность и электрическая поляризация в $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ при различном содержании кислорода

© Ю.М. Николаенко<sup>1</sup>, Ю.Е. Кузовлев<sup>1</sup>, Ю.В. Медведев<sup>1</sup>, Н.И. Мезин<sup>1</sup>, А.Н. Бондарчук<sup>2</sup>, А.Б. Глот<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, Донецк, Украина

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, Mexico

E-mail: nik@fti.dn.ua

(Поступила в Редакцию 22 ноября 2010 г.)

В окончательной редакции 28 апреля 2011 г.)

Экспериментально изучены электрические характеристики окиси индия, допированной стронцием, при отклонении от стехиометрического состава по кислороду. Допирование сильно понижает проводимость  $\text{In}_2\text{O}_3$  и делает ее очень чувствительной к содержанию кислорода. Малому кислородному дефициту образцов соответствует высокорезистивное состояние, которое формируется за счет снижения концентрации носителей заряда и прозрачности потенциальных барьеров на границах кристаллитов. Установлено, что кислородный дефицит в  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  восстанавливает высокую проводимость  $n$ -типа, что согласуется с представлениями о вакансиях кислорода как о мелких донорах. При достаточном кислородном дефиците потенциальные барьеры не проявляются, но по мере роста содержания кислорода возникает потенциальный рельеф, приводящий к набору необычных эффектов. Это специфическая нелинейность и гистерезис вольт-амперной характеристики, обусловленные туннельно-прозрачными потенциальными барьерами, увеличение диэлектрической проницаемости на частоте  $10^5$  Hz при  $T = 77$  K до величины 13.3, а также температурные аномалии измеряемых параметров, связанные с топологическим фазовым переходом к пространственно неоднородной проводимости образцов. При малых отклонениях от стехиометрического состава по кислороду обнаружена чувствительность к давлению и составу газовой среды не только активной, но и емкостной составляющей проводимости  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ .

Один из авторов (А.Б. Глот) выражает благодарность DAAD Foundation (Германия) за грант A/98/09017 (1998), в рамках которого впервые была синтезирована керамика  $\text{In}_2\text{O}_3-\text{SrO}$  и обнаружены неомические эффекты в этом материале.

### 1. Введение

Интерес к широкозонному оксидному полупроводнику  $\text{In}_2\text{O}_3$  связан с применением соединений на его основе в оптоэлектронике [1], а также с перспективами создания неорганических адсорбционных сенсоров для газоанализаторов и измерителей влажности [2]. Кроме того, пленки окиси индия использовались ранее в качестве модельного материала для изучения механизмов проводимости в условиях квантовой локализации электронов в системах пониженной размерности (см., например, [3]).

Несмотря на широкую запрещенную зону (3.6 eV — прямая щель, 2.1–2.7 eV — непрямая [4]), образцы  $\text{In}_2\text{O}_3$  обнаруживают высокую электропроводность  $n$ -типа с минимальной концентрацией электронов проводимости при комнатной температуре порядка  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [15]. К росту концентрации носителей заряда приводит отклонение от стехиометрического состава по кислороду. Избыточный кислород, по мнению авторов работы [6], может выступать в роли акцепторов. При допировании окиси индия атомами Sn концентрация электронов может быть увеличена до  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  [1,7]. Это соединение, оптически прозрачное и обладающее высокой проводимостью, представляет наибольший интерес для приме-

нения в оптоэлектронике. Для сенсорных применений исследуется  $\text{In}_2\text{O}_3$  с добавками оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SrO}$  [2].

Добавки  $\text{SrO}$  могут способствовать возникновению необычных свойств полученного материала, например неомической проводимости образцов, проявляющей тенденцию к насыщению величины тока с ростом напряжения [8]. Эффект объясняется образованием потенциальных барьеров на границах зерен керамики, высота которых изменяется за счет стимулированного электрическим полем дополнительного поглощения кислорода [9].

Отметим, что, несмотря на практическое применение окиси индия, многие вопросы, касающиеся механизмов проводимости и вида электрически активных дефектов, остаются дискуссионными. В частности, многие теоретические расчеты указывают на то, что вакансии кислорода должны быть глубокими центрами, а роль мелких доноров с энергией ионизации порядка 0.1 eV должны играть дефектные комплексы (небольшой обзор работ на эту тему имеется во Введении работы [5]). Тем не менее недавно проведенные расчеты с учетом степени ионизации и положения дефектов в сложной элементарной ячейке, содержащей 80 атомов, подтверждают представления о вакансиях кислорода как о мелких донорах,

которые, кроме того, характеризуются заметной диффузионной подвижностью при невысоких температурах 370–640 К [10,11]. Авторы [10] на основе своих расчетов также делают вывод о невозможности существования проводимости  $p$ -типа в окиси индия, что не противоречит данным работы [5], авторы которой связывают происхождение электронов проводимости с неконтролируемой концентрацией чужеродных атомов.

В настоящей работе мы сообщаем о результатах исследования поликристаллических образцов  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  с различным содержанием кислорода, которое обратимо варьировалось с помощью термообработки. Установлен ряд новых фактов, связанных с поведением проводимости и электрической поляризации, которые согласуются с результатами работ [10,11], а также позволяют рассматривать  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  в качестве модельного материала для экспериментального изучения электрических явлений в полупроводнике с регулируемым потенциальным рельефом зоны проводимости.

## 2. Технология приготовления образцов, вариация содержания кислорода и температурные зависимости сопротивления $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$

Образцы получены путем смешивания порошков исходных компонентов  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{SrCO}_3$  в весовом соотношении 9/1 в дистиллированной воде с последующим компактированием в виде таблеток диаметром 10 мм и толщиной 3 мм под давлением 100 МПа. Спекание образцов проводилось при температуре 1473 К в течение 10 ч. Полученные образцы характеризуются поликристаллической структурой и значительной пористостью (рис. 1, *a*). Измерительные электрические контакты создавались с помощью контактола (silver conducting paint) фирмы Electrolube, застывающего при комнатной температуре. После застывания органическая составляющая контактола удалялась путем отжига при  $T = 600$  К.

Установлено, что выдержка образцов при температуре 500–600 К в кислородсодержащей среде с последующим охлаждением до комнатной температуры приводит к значительному уменьшению проводимости. И наоборот, отжиг в невысоком (1–10 Па) вакууме, а также в атмосфере аргона или азота приводит к росту проводимости. На рис. 1, *b* показана динамика изменения сопротивления кислороддефицитного образца во время отжига в воздушной атмосфере при температуре 570 К. Сопротивление измерялось на постоянном токе по четырехзондовой схеме. Процедура отжига включала семь отдельных этапов с продолжительностью по 4–6 h каждый.

После окончания предыдущего и перед началом следующего этапа отжига образец около 18 h находился при комнатной температуре. Как видно из рис. 1, *b*, начиная

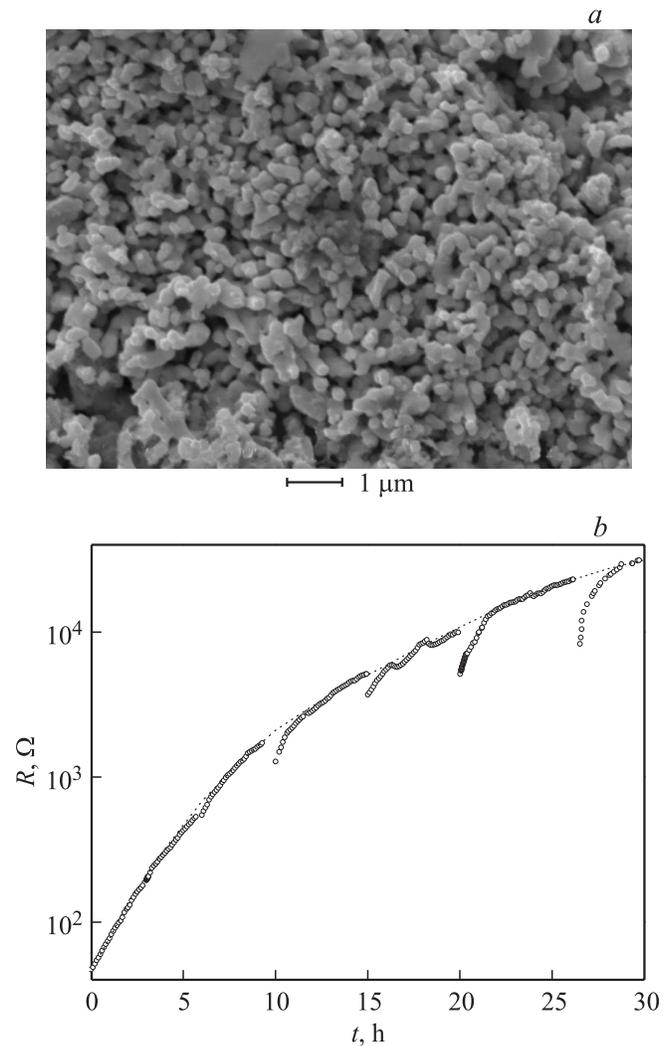


Рис. 1. Микроструктура образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  (*a*) и изменение сопротивления со временем отжига на воздухе при  $T = 570$  К (*b*).

с третьего участка кривой значения сопротивлений, соответствующих окончанию предыдущего и началу следующего этапа отжига, не совпадают. Стартовое значение оказывается заниженным, и его величина постепенно выходит на плавную огибающую кривую  $R(t)$  примерно в течение 1–1.5 h. Мы связываем этот релаксационный процесс с восстановлением градиентного распределения вакансий кислорода, нарушенного во время перерыва между двумя этапами отжига, за счет диффузии анионов внутри образца с неоднородной микроструктурой.

Огибающая кривая на рис. 1, *b* характеризует сопротивление образца, включающее объемное сопротивление как кристаллитов, так и их границ, соотношение между которыми при различном содержании кислорода не остается постоянным. Очень важно, что огибающая кривая является монотонной, т.е. большему времени отжига (меньшему значению  $\delta$ ) соответствует большее значение сопротивления, причем эта закономер-

ность остается справедливой и в интервале температур 77–300 К. Это выгодно отличает  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  от чистой окиси индия, для которой наблюдается резкое падение подвижности с повышением температуры выше комнатной [5]. Поэтому в наиболее важной области температур  $T = 300\text{--}800$  К подобная зависимость невыразительна. Повышение концентрации носителей заряда с ростом температуры может сопровождаться уменьшением проводимости [5].

В случае  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  удельное сопротивление в равновесном состоянии образца при комнатной температуре можно связать с содержанием кислорода. Реально достижимый диапазон изменения удельного сопротивления  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  при комнатной температуре за счет изменения  $\delta$  составляет не менее пяти порядков ( $30\text{--}3 \cdot 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ). При понижении температуры до 77 К диапазон изменения увеличивается еще на три порядка.

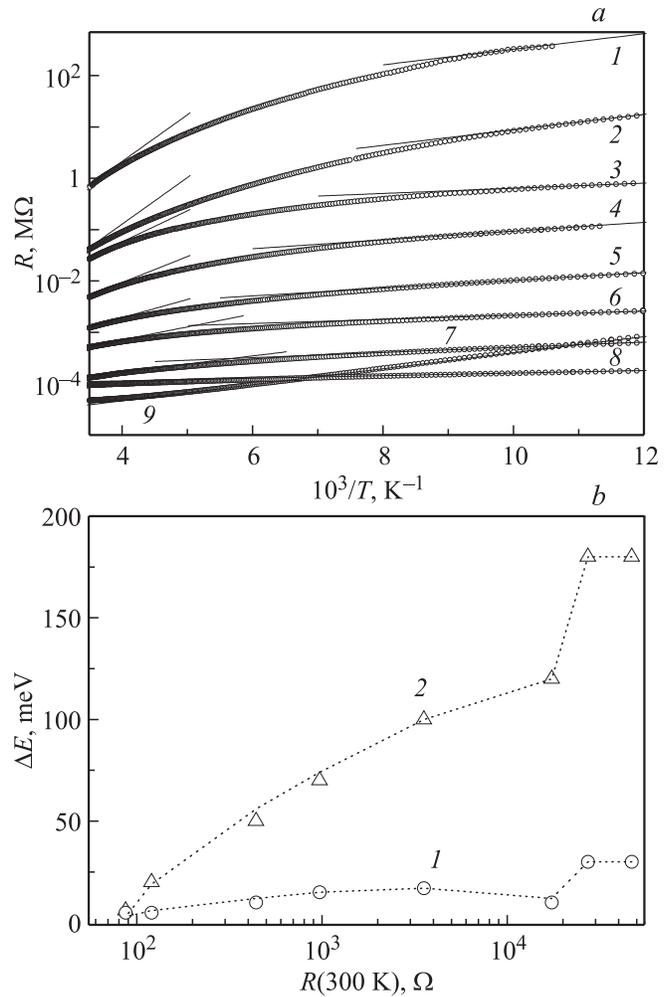
На рис. 2, *a* приведены температурные зависимости сопротивления образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  с различным содержанием кислорода (кривые 1–8). Величина  $\delta$  монотонно возрастает при переходе от кривой 1 к кривой 8. Кривая 9 представляет зависимость  $R(T)$  для образца  $\text{In}_2\text{O}_3$ , приготовленного по описанной выше технологии, без примеси стронция. Она в широком интервале температур  $T = 77\text{--}200$  К линейна, что соответствует стандартной зависимости Аррениуса  $R = R_0 \exp(\Delta E/kT)$  с энергией активации  $\Delta E = 31$  meV. Такое значение является типичным для  $\text{In}_2\text{O}_3$  [12].

Допирование  $\text{In}_2\text{O}_3$  стронцием приводит к резкому повышению сопротивления, а кислородный дефицит его понижает, причем *n*-тип проводимости, контролируемый по знаку термоэдс, в кислороддефицитном состоянии сохраняется. Это полностью соответствует представлениям о вакансиях кислорода как о мелких донорах [10,11].

В кислороддефицитном состоянии  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  зависимость  $R(T)$  (кривая 8) отличается от кривой 9 для чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$  значительно меньшим диапазоном изменения. Она соответствует зависимости Аррениуса с очень малым значением энергетического параметра  $\Delta E = 5$  meV. Отметим, что пленки  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  также характеризуются практическим отсутствием температурной зависимости сопротивления, что типично для сильнолегированных полупроводников.

По мере снижения кислородного дефицита в  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  диапазон температурных изменений  $R(T)$  монотонно растет и достигает трех порядков величины для кривой 1. Одновременно сужается область температур, в которой закон Аррениуса описывает зависимость  $R(T)$ .

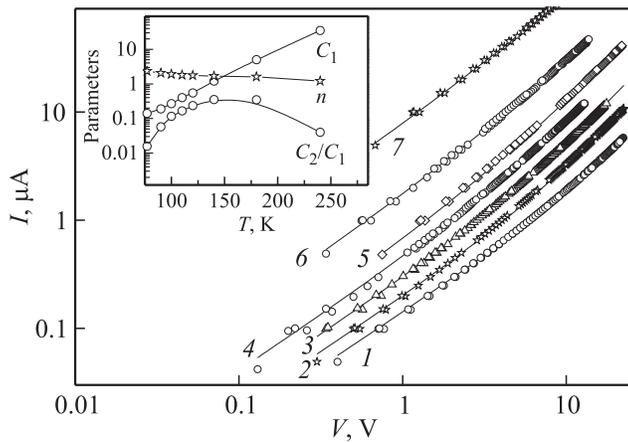
Отметим, что кривые  $R(T)$  в координатах  $\lg R - T^{-n}$  (где  $n = 1/2, 1/4$ ), соответствующих известным теориям, также не линеаризуются, что свидетельствует о более сложном механизме проводимости. Можно предположить, что усложняющий фактор составляют потенциальные барьеры на границах зерен [9] и, возможно, мелкомасштабных кластеров, которые создают про-



**Рис. 2.** *a*) Температурные зависимости сопротивления образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  с различным содержанием кислорода. Кривые 1–8 соответствуют последовательному росту  $\delta$ . Кривая 9 — зависимость для образца  $\text{In}_2\text{O}_3$ . *b*) Изменение энергетического параметра зависимости Аррениуса, соответствующей  $R(T)$  в области низких температур (1) и  $T = 300$  К (2).

странственный рельеф зоны проводимости. На рис. 2, *b* кривая 1 показывает динамику роста параметра  $\Delta E$  с увеличением содержания кислорода, которое в свою очередь характеризуется сопротивлением образца при  $T = 300$  К. Значения  $\Delta E$  определены по низкотемпературной части зависимости  $R(T)$ . Кривая 2 соответствует начальному наклону кривых  $\lg R(T)$  при  $T = 300$  К. Как видно, обе зависимости указывают на рост высоты потенциальных барьеров по мере убывания кислородного дефицита. Температурные изменения параметра  $\Delta E$ , по-видимому, свидетельствуют о наличии статистического распределения барьеров по высоте.

С уменьшением кислородного дефицита потенциальный рельеф начинает проявляться в виде небольшой специфической нелинейности вольт-амперной характери-



**Рис. 3.** ВАХ образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ .  $T = 77$  (1), 90 (2), 100 (3), 110 (4), 120 (5), 140 (6) и 180 (7). На вставке — температурная зависимость подгоночных параметров, использованных при аппроксимации ВАХ.

стики (ВАХ). На рис. 3 показан набор ВАХ образца с сопротивлением при комнатной температуре около  $4 \text{ k}\Omega$ . При малых напряжениях ВАХ линейны, неомичность проявляется с ростом напряжения выше  $1\text{--}2 \text{ V}$ . Во всей области напряжений экспериментальные данные хорошо описываются зависимостью  $I = c_1V + c_2V^n$ , представленной на рис. 3 сплошными линиями. Коэффициент  $c_1$  фактически определяется малыми полями, а  $c_2$  — относительно большими. На вставке к рис. 3 показаны температурные изменения параметров. Как видно, сначала с ростом температуры наблюдается рост неомической части проводимости по отношению к линейной  $c_2/c_1$  и одновременно уменьшение показателя степени от  $n = 2.33$  при  $77 \text{ K}$  до  $n = 1.66$  при  $140 \text{ K}$ . При  $T > 280 \text{ K}$  нелинейность в этом состоянии образца не проявляется.

Отметим, что формально показатель степени  $n = 2.33 \approx 7/3$  соответствует известной модели Глазмана и Матвеева [13], описывающей туннелирование электронов через потенциальный барьер с разрешенными локализованными состояниями внутри барьера. С другой стороны, на нелинейность ВАХ может существенно влиять форма потенциала. При описании ВАХ в рамках модели барьеров прямоугольной формы необходимо учитывать распределение барьеров по высоте.

При относительно высокой проводимости внутри гранулы падение напряжения происходит в основном на барьерах. В длинной одномерной цепочке гранул количество барьеров примерно совпадает с количеством гранул. В трехмерном образце проводимость в микроскопическом масштабе также является неоднородной, но падение напряжения на грануле по порядку величины можно оценить по среднему падению напряжения на поперечном слое образца толщиной  $d$ :  $\Delta V = Vd/L$ , где  $L$  и  $d$  — размер образца вдоль поля и средний размер гранулы. При  $d = 3 \mu\text{m}$  (рис. 1, а) и внешнем поле  $E \leq 22 \text{ V/cm}$  максимальное падение напряжения  $\Delta V$  по-

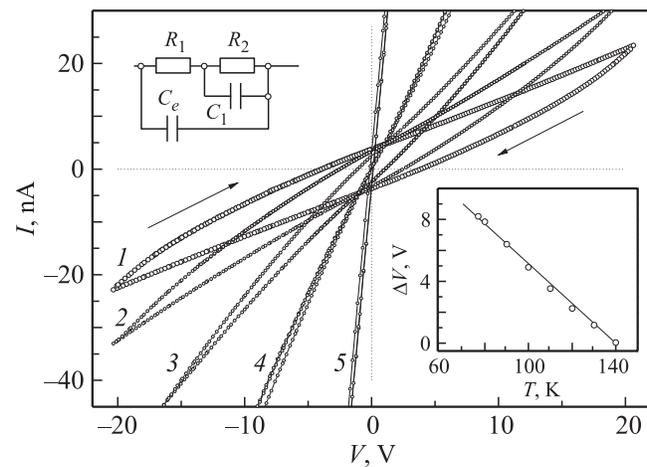
лучается равным  $0.66 \text{ mV}$ . С учетом величины энергии  $kT = 6.63 \text{ meV}$  при  $T = 77 \text{ K}$  такой потенциал будет малоэффективным. Это означает, что часть межгранульных границ составляют прозрачные при этой температуре барьеры, а кластеры с относительно высокой проводимостью составляют группы из нескольких гранул.

С повышением температуры увеличиваются размер кластеров и падение напряжения на барьерах, определяющих нелинейность образца. Этот процесс отражает начальный рост отношения коэффициентов  $c_2/c_1$  на вставке к рис. 3. В то же время последовательный рост размера низкоомных кластеров постепенно приводит к пространственному шунтированию высокоомных областей. Этот процесс отражает убывание показателя степени от  $n = 2.33$  при  $T = 77 \text{ K}$  до  $n = 1$  при  $T > 280 \text{ K}$ .

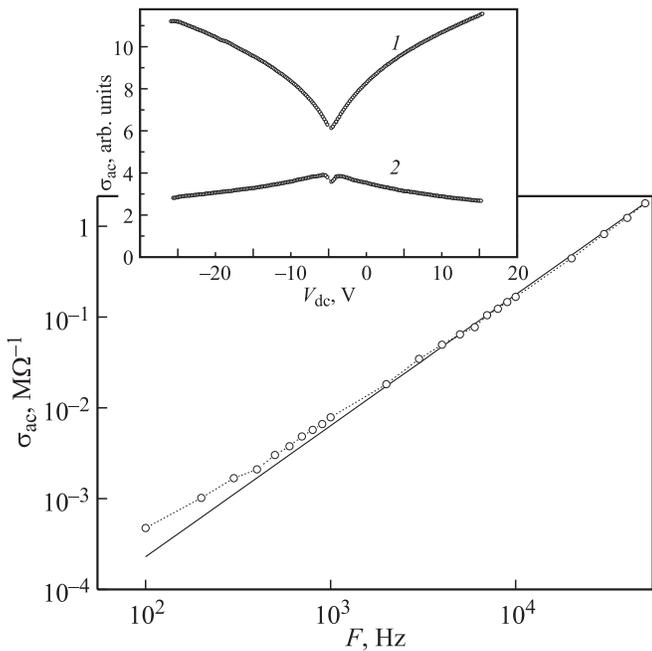
### 3. Поляризационные эффекты

Интересный факт обнаружен нами для состояния образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ , достаточно сильно насыщенного кислородом и характеризуемого кривой  $I$  на рис. 2, а. Образец имеет стационарную проводимость около  $10^{-9} \Omega^{-1}$ . При сканировании величины питающего напряжения  $I$ – $V$ -характеристики, измеренные по двухзондовой схеме в области температур  $T = 77\text{--}140 \text{ K}$ , демонстрируют ярко выраженную петлю гистерезиса (рис. 4). Время сканирования напряжения от источника с низким выходным сопротивлением при записи всей петли составляло  $30 \text{ s}$ .

Наблюдаемая при  $77 \text{ K}$  петля гистерезиса хорошо воспроизводится экспериментально с помощью простейшей эквивалентной схемы образца, приведенной на верхней вставке к рис. 4, при значениях  $R_1 = R_2 = 500 \text{ M}\Omega$  и величине емкости  $C_1 = 5000 \text{ pF}$ . Резистор  $R_1$  мы связываем с сопротивлением объема образца, а  $R_2$  и  $C_1$  — с потенциальным барьером в окрестности металлических электродов. Конденсатор  $C_e$  моделирует взаимную



**Рис. 4.** Гистерезис ВАХ образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ .  $T = 80$  (1), 90 (2), 100 (3), 140 (4) и  $200 \text{ K}$  (5). На вставках — эквивалентная схема образца (вверху) и температурная зависимость ширины петли гистерезиса (внизу).



**Рис. 5.** Частотная зависимость адмиттанса образца. На вставке — зависимость активной (1) и емкостной (2) составляющих проводимости образца на частоте  $10^5$  Hz от постоянного напряжения смещения при  $T = 77$  K.

емкость электродов. Примерное равенство значений  $R_1$  и  $R_2$  было установлено с помощью измерений по четырехзондовой схеме. Интерпретация основана на следующих фактах.

Измерение проводимости на переменном токе в диапазоне частот  $F = 10^2 - 10^5$  Hz указывает на отсутствие anomalно высокой диэлектрической проницаемости в объеме образца. Как видно из рис. 5, емкостная составляющая проводимости при  $F > 10^3$  Hz хорошо согласуется с расчетной зависимостью, представленной на этом рисунке сплошной линией, которая в свою очередь соответствует емкостной проводимости конденсатора номиналом 4.8 pF. С учетом геометрии электродов образца значение диэлектрической проницаемости получается равным  $\epsilon = 13.3$ , что всего в 1.5 раза выше, чем в чистой окиси индия [14].

Таким образом, природу наблюдаемого гистерезиса следует прежде всего связать с „барьерной“ емкостью в окрестности металлических контактов. В пользу этого предположения свидетельствуют также результаты измерений с помощью четырехзондовой схемы, когда гистерезис в цепи высокоомного вольтметра, подключенного к образцу с помощью дополнительных контактов малой площади, наблюдается в более широкой области температур  $T < 200 - 250$  K, где сопротивление образца падает более чем на порядок. Это объясняется более высоким сопротивлением измерительной цепи и соответственно ее большей постоянной времени.

Отметим, что эквивалентная схема количественно описывает не все особенности гистерезиса, приведен-

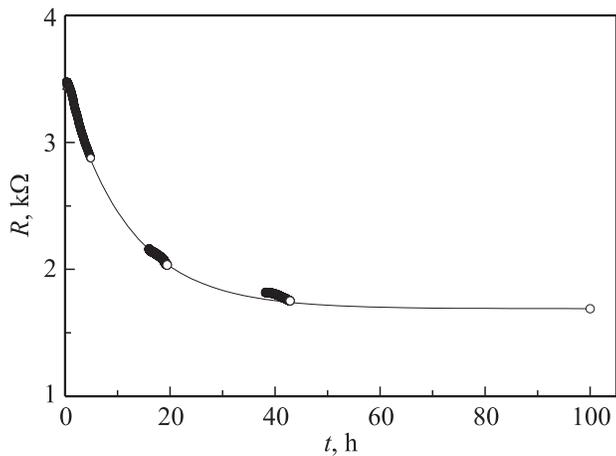
ного на рис. 4. Ширина гистерезиса в соответствии со значениями элементов схемы при сканировании внешнего напряжения с постоянной скоростью должна монотонно убывать по мере увеличения времени записи полной петли более чем за  $\Delta t > 10$  s. В эксперименте с образцом обнаруживается немонотонность этой зависимости в виде небольшого дополнительного максимума при  $\Delta t > 50$  s. Это свидетельствует о действии некоторого дополнительного процесса. Возможный механизм дополнительной „медленной поляризации“ может быть обусловлен нарушением электронейтральности проводящих кластеров образца при максимальном сканирующем напряжении и затем относительно медленным стеканием избыточного заряда через потенциальные барьеры при уменьшении внешнего напряжения.

На вставке к рис. 5 приведена зависимость активной и емкостной составляющих проводимости образца на переменном токе с частотой 100 kHz от постоянного напряжения смещения. Гистерезис  $I(V)$  в этом состоянии образца не наблюдается. Зависимость активной составляющей проводимости (кривая 1) показывает, что обсуждавшаяся выше нелинейность ВАХ на постоянном токе действительно связана с объемом образца. Зависимость емкостной составляющей от постоянного напряжения смещения (кривая 2) можно рассматривать как дополнительное свидетельство возникновения обедненного носителями заряда слоя в окрестности металлических электродов. Наличие такой зависимости многими научными группами связывается с вариацией толщины этого слоя. Небольшой обзор исторических данных по этому вопросу содержится в работе [15].

#### 4. Обсуждение результатов

К наиболее интересным следствиям допирования окиси индия стронцием следует отнести значительный рост чувствительности электрического сопротивления к кислородной стехиометрии. Один из факторов состоит в том, что образцы чистой окиси индия характеризуются высокой (порядка  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) концентрацией электронов проводимости, и область изменения за счет вариации содержания кислорода оказывается ограниченной снизу [5]. Допирование  $\text{In}_2\text{O}_3$  атомами стронция понижает концентрацию свободных носителей заряда и таким образом расширяет диапазон изменения сопротивления.

Второй фактор составляют потенциальные барьеры на границах гранул. Конечно, характеристики барьеров сильно зависят от технологии. В наших образцах при создании достаточного кислородного дефицита барьеры полностью подавляются, и затем прозрачность барьеров плавно уменьшается по мере увеличения содержания кислорода, обеспечивая кругую и монотонную зависимость сопротивления образца. Монотонность зависимости сопротивления от содержания кислорода в отличие от чистой окиси индия [5] не нарушается в широком интервале температур от 77 до 600 K и наглядно свиде-



**Рис. 6.** Зависимость сопротивления образца  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  от времени после снижения давления воздуха от нормального атмосферного до 1 Па.

тельствует о справедливости выводов теоретических работ [10,11] в отношении вакансий кислорода как мелких доноров, характеризующихся достаточно высокой диффузионной подвижностью при невысоких температурах. Тип проводимости в кислороддефицитном состоянии  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  проверялся нами по знаку термоэдс; так же как и для чистого  $\text{In}_2\text{O}_3$ , он соответствует электронному типу.

Другая группа результатов, связанных с допированием окиси индия стронцием, носит методический характер.  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$  оказался хорошим модельным материалом для изучения электрических явлений при наличии регулируемого с помощью термообработки потенциального рельефа зоны проводимости. Вместе с тем следует учитывать ряд особенностей.

В частности, огибающая кривая на рис. 1, *b* характеризует изменение концентрации электронов проводимости за счет вариации содержания кислорода в объеме кристаллитов и на их границах. Несовпадение величин сопротивления до и после перерыва между двумя этапами отжига (рис. 1, *b*) как раз отражает неоднородную структуру и пористость образца. При комнатной температуре обмен кислородом образца с внешней средой затруднен, а диффузия анионов внутри кристаллитов уменьшает неоднородность распределения, за счет чего проводимость образца возрастает, и в начале следующего этапа отжига необходимо время для восстановления неоднородного распределения анионов при повышенной температуре.

Туннельные потенциальные барьеры разной высоты являются источником специфического „медленного“ гистерезиса ВАХ, связанного с накоплением заряда на отдельных гранулах. Наличие потенциальных барьеров на границах гранул проявляется и на более высоких частотах до  $10^5$  Hz. Об этом свидетельствует результат изменения диэлектрической проницаемости  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ ,

которая оказалась в 1.5 раза больше, чем в  $\text{In}_2\text{O}_3$  при 77 К.

При комнатной температуре наблюдается еще одна группа эффектов, связанная с долговременной релаксацией сопротивления после внешних воздействий, например после изменения давления газовой среды (рис. 6). Эту зависимость следует интерпретировать как установление квазиравновесного состояния в системе с взаимозависимыми параметрами. Имеется в виду зависимость высоты потенциальных барьеров от содержания кислорода, механических воздействий, а также от диффузии анионов под действием электрических полей и механических напряжений. Ранее подвижность анионов кислорода под действием механических напряжений (эффект Горского) при комнатной температуре была обнаружена в манганитах [16,17].

В заключение отметим возможность повышения чувствительности проводимости к составу газовой атмосферы и влажности в связи с проведенным рассмотрением. Прежде всего снижение объемной проводимости за счет допирования стронцием повышает чувствительность образца к этим воздействиям. Другая важная особенность — это зависимость высоты потенциальных барьеров на границах кристаллитов от технологии приготовления образцов, поэтому технологические режимы для конкретной задачи следует оптимизировать.

Отметим также чувствительность образцов к содержанию в атмосфере паров органических растворителей, в частности ацетона. Если продукты распада органического растворителя не удалить путем отжига, то это приводит к росту не только активной, но и емкостной составляющей проводимости, измеренной на звуковых частотах.

## 5. Заключение

Экспериментально изучены явления переноса заряда в поликристаллических образцах окиси индия, допированных стронцием, при изменении содержания кислорода. Обнаружена высокая по сравнению с недопированным  $\text{In}_2\text{O}_3$  чувствительность электрического сопротивления образцов к содержанию кислорода. Широкий диапазон изменения проводимости (более семи порядков величины при  $T = 77$  К) в зависимости от содержания кислорода объясняется изменением концентрации электронов проводимости в объеме кристаллитов и прозрачности потенциальных барьеров на их границах. Наблюдаемые зависимости согласуются с представлениями о вакансиях кислорода как о мелких донорах. В высокорезистивном состоянии образцов наличие туннельно-прозрачных потенциальных барьеров приводит к гистерезису ВАХ и небольшому повышению диэлектрической проницаемости по сравнению с чистым  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Потенциальные барьеры проявляются также в виде нелинейности ВАХ. При достаточном повышении кислородного дефицита потенциальные барьеры подавляются,

о чем свидетельствует безактивационная температурная зависимость сопротивления. Обнаружена чувствительность к давлению и составу газовой среды не только активной, но и емкостной составляющей проводимости  $\text{In}_2\text{O}_{3-\delta} : \text{Sr}$ , измеренной на частотах  $10^3 - 10^5$  Hz.

## Список литературы

- [1] H.L. Hartnagel, A.K.J. Dawar, C. Jagadish. *Semiconducting transparent thin films*. Institute of Physics Publ., Bristol & Philadelphia (1995). 358.
- [2] K. Arshak, K. Twomey. *Sensors* **2**, 205 (2002).
- [3] Z. Ovadyahu, Y. Imry. *J. Phys. C: Solid State Phys.* **18**, L L 9 (1985).
- [4] P. Erhart, A. Klein, R.G. Egdell, K. Albe. *Phys. Rev. B* **75**, 153 205 (2007).
- [5] Y. Ohya, T. Yamamoto, T. Ban. *J. Am. Ceram. Soc.* **91**, 240 (2008).
- [6] D. Mergel, Z. Qiao. *J. Appl. Phys.* **95**, 5608 (2004).
- [7] H. Fujiwara, M. Kondo. *Phys. Rev. B* **71**, 075 109 (2005).
- [8] A. Glot, G. Behr, J. Werner. *Key Eng. Mater.* **206–213**, 1441-4 (2002).
- [9] A. Bondarchuk, A. Glot, G. Behr, J. Werner. *Eur. Phys. J: Appl. Phys.* **39**, 3, 211 (2007).
- [10] P. Agoston, K. Albe, R.M. Nieminen, M.J. Puska. *Phys. Rev. Lett.* **103**, 245 501 (2009).
- [11] P. Agoston, K. Albe. *Phys. Rev. B* **81**, 195 205 (2010).
- [12] Z.M. Jarzebsky. *Phys. Status Solidi A* **71**, 13 (1982).
- [13] Л.И. Глазман, К.А. Матвеев. *ЖЭТФ* **94**, 332 (1988).
- [14] A. Walsh, C. Richard, A. Catlow, A.A. Sokol, S.M. Woodley. *Chem. Mater.* **21**, 4962 (2009).
- [15] M. Dawber, K.V. Rabe, J.F. Scott. *ArXiv; cond-mat/0503372v* (2005).
- [16] Yu.V. Medvedev, N.I. Mezin, Yu.M. Nikolaenko, A.E. Pigur, N.V. Shishkova, V.M. Ishchuk, I.N. Chukanova. *Acta Phys. Pol. A* **106**, 853 (2004).
- [17] Yu.V. Medvedev, N.I. Mezin, Yu.M. Nikolaenko, A.E. Pugur, N.V. Shishkova, V.M. Ishchuk, I.N. Chukanova. *Phys. Status Solidi C* **1**, 3614 (2004).