

Д. ф.-м. н. А. Е. Соловьева (✉)

Сухумский физико-технический институт
Академии наук Абхазии, Сухум, Республика Абхазия

УДК 546.682-31.017:620.181.4

ИЗМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОКСИДА ИНДИЯ ПРИ НАГРЕВЕ НА ВОЗДУХЕ

При термическом и электрическом воздействии в интервале 25–1100 °С на воздухе в структуре оксида индия обнаружен при 550 °С фазовый переход первого рода, при котором структурные анионные вакансии смещаются в междоузлия решетки и появляется неупорядоченная фаза типа C^1 . Энергия перехода равна 0,24 эВ. В интервале 550–800 °С в оксиде индия происходит постепенный фазовый переход второго рода упорядоченной кубической фазы типа C в неупорядоченную типа C^1 . Обнаружены фазовые превращения сопровождаются различием термического расширения и проводимостью носителей заряда фаз двух типов: C и C^1 . Ионная проводимость зарядов в структуре оксида индия существует до 550 °С с энергией 1,44 эВ. В оксиде индия в интервале 550–800 °С существует смесь двух типов проводимости: ионная и электронная. Электронная проводимость сохраняется в интервале 800–1100 °С с энергией 1,20 эВ. Аналитическим и графическим методами определены размеры радиусов катиона индия, кислорода и анионной вакансии. Приведенный в статье фрагмент изменения расположения атомов в оксиде индия при нагреве и наложение электрического поля на воздухе позволили понять механизм перехода анионной проводимости в электронную. По экспериментальным данным рассчитаны механические свойства оксида индия.

Ключевые слова: поликристаллический оксид индия, нагрев на воздухе, кристаллическая структура, рентгеновское исследование, проводимость.

ВВЕДЕНИЕ

Материалы из поликристаллического оксида индия представляют практический интерес как материалы, обладающие проводимостью свободных носителей заряда. Нанокристаллические соединения на основе оксидов типа In_2O_3 с добавками разных диоксидов, в том числе пленки, обладают электрическими, оптическими, сенсорными, термическими, прочностными и другими свойствами. Такие материалы могут использоваться в разных областях техники: в виде преобразователей энергии, как источники энергии, твердого топлива, материалы радиоэлектроники (микротермисторы), как материалы, обладающие люминесценцией, как стабилизаторы структуры типа флюорита в соединениях на основе ZrO_2 , HfO_2 , CeO_2 и PrO_2 [1–10].

Действие нагрева и электрического поля на материалы из тугоплавких оксидов приводит к необратимым изменениям свойств диэлектриков и полупроводников. В керамических материалах в таких условиях происходят окрашивание со стороны катода, снижение пробивного напряжения, образование дефектов типа анионных вакансий, центров окраски, которые существенно влияют на фазовые превращения в структуре оксидов. Проводимость оксидных материалов при нагреве в разных средах при наложении электрического поля бывает ионная, смешанная, электронная и протонная. Оксид индия по своей структуре и свойствам относится к оксидам типа Me_2O_3 (Sc_2O_3 , In_2O_3 , R_2O_3 , где R — редкоземельный элемент), обладает высокой температурой плавления, является полупроводником, имеет кубическую структуру типа C – $Ia3$. В этой структуре содержится 25 % закономерно упорядоченных анионных вакансий, которые являются элементами структуры. При разных воздействиях на материал структурные вакансии могут объединяться с атомами примеси, образуя комплексы дефектов. Накопление таких дефектов изменяет структуру и свойства полупроводниковых оксидных материалов [11, 12]. Информация о наличии струк-



А. Е. Соловьева
E-mail: aesolovyeva39@gmail.com

турных превращений и типов проводимости свободных носителей зарядов, о механических свойствах в условиях сохранения химического состава оксида индия при нагреве на воздухе в литературе не обнаружена.

Цель настоящей работы — исследование механизмов влияния дефектов структуры на изменения физических свойств поликристаллического оксида индия при термическом и электрическом воздействии в интервале 25–1100 °С на воздухе (условия постоянного химического состава оксида). Результаты этой работы позволят одновременно наблюдать изменения структурных свойств, связанных с фазовыми превращениями оксида индия, и определять изменения его электрофизических свойств. Структурные свойства и электропроводность в оксидах Me_2O_3 должны быть взаимосвязаны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования использовали порошок оксида In_2O_3 квалификации ос. ч. Образцы прессовали без связки в виде прямоугольников размерами 0,02×0,005×0,005 м при 400 °С и давлении 0,5 ГПа на воздухе. Полученные образцы стехиометрического состава обладали следующими электрофизическими и структурными свойствами: $a = 1,0120$ нм, плотность $\rho = 7,116$ кг/см³, удельное электросопротивление $\rho = 1,2 \cdot 10^{-2}$ Ом·см, термо-э. д. с. $\alpha = 104$ мкВ/град, скорость свободных носителей заряда $v = 136$ см/с, подвижность свободных носителей заряда $\mu = 34$ см²/(В·с), концентрация носителей заряда $n = 1,4 \cdot 10^{19}$ см⁻³, цвет — желтый.

Фазовый состав и параметры кристаллических решеток структуры оксида индия определяли на модернизированной установке ДРОН-0,5 в $Su K_\alpha$ -излучении. Параметры кристаллической решетки оксида индия определяли методом построения профиля линии (622) по точкам через каждую минуту по θ , град, с точностью определения параметра элементарной ячейки $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ нм.

Удельное электросопротивление определяли двухзондовым методом с ошибкой примерно 3 %. Ошибка измерения концентрации носителей заряда n и подвижности μ составляла около 3 %. Энергию термического расширения и проводимость свободных носителей заряда оксида индия рассчитывали с погрешностью $\pm 0,01$ эВ. Спрессованные образцы чистого оксида индия исследовали при нагреве на воздухе в интервале 25–1100 °С в высокотемпературной приставке к рентгеновской установке. Одновременно измеряли ρ образцов по изменению тока при наложении постоянного напряжения. Для этой цели в торцах прямоугольного образца сверлили отверстия для платиновых электро-

дов. Погрешность измерения ρ составляла 3 %. Образец оксида индия нагревали со скоростью 10 °С/мин с выдержкой при каждой фиксированной температуре, снимали рентгенограмму, измеряли параметр решетки до постоянной величины. Образец исследовали через каждые 50–100 °С. Определяли фазовый состав оксида индия, измеряли параметры элементарных ячеек фаз по точкам (каждую точку измеряли 3 раза) и определяли ρ при каждой фиксированной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нахождение правильных значений радиусов катиона индия, кислорода и анионной вакансии дает возможность определить тип структуры и тип проводимости свободных носителей зарядов. Необходимо определить точную величину параметра элементарной ячейки оксида индия, по которой можно найти правильное значение ионного радиуса катиона индия, радиуса кислорода по шкале Темплтона и Добена. Эта шкала используется для структур типов С и F. Полученные значения радиусов катиона индия и кислорода составляют $r_{In} = 0,07926$ нм, $r_O = 0,13735$ нм. По математической модели [13, 14] рассчитывали радиус структурной анионной вакансии: $r_v = 0,137348$ нм.

В образцах оксида индия при нагреве на воздухе в интервале 25–1100 °С было обнаружено расщепление рентгеновских линий (211), (222), (400), (622) в интервале 550–800 °С. Расщепление линий от плоскости (622) показано на рис. 1. Расщепление линии на две с одинаковой интенсивностью при 550 °С указывает на фазовое превращение типа сдвига, связанное с нарушением порядка анионных вакансий в кубической структуре типа С и на появление неупорядоченной кубической структуры типа С¹. Обнаруженное превращение относится к фазовому превращению первого рода.

Фазовое изменение структуры оксида индия при 700 °С сопровождается перераспределением интенсивности линий фаз и изменением их концентрации (рис. 2).

В интервале 550–800 °С происходит постепенное превращение фазы типа С в фазу типа С¹ (рис. 3) — фазовое превращение второго рода. Эти фазовые превращения обратимые, если охлаждать образцы от температуры, при которой нет потери кислорода кристаллической решеткой оксида индия. Изменения параметров кристаллических решеток обнаруженных фаз в интервале 25–1100 °С показаны на рис. 3. Существование двух фаз в интервале 550–800 °С обуславливает различие ТКЛР этих фаз и неодинаковую конфигурацию атомов в этих структурах.

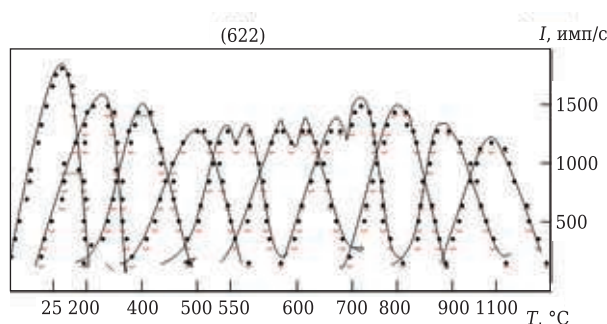


Рис. 1. Расщепление рентгеновской линии от плоскости (622) при нагреве образца оксида индия в интервале 25–1100 °C на воздухе

Величина ТКЛР упорядоченной фазы оксида индия при нагреве до 550 °C равна $8,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Энергия термического расширения упорядоченной фазы составляет 1,48 эВ. С повышением температуры нагрева до 800 °C ТКЛР уменьшается до $7,23 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. В интервале 550–1100 °C (см. рис. 3) существует неупорядоченная фаза оксида индия типа C^1 с энергией расширения 1,24 эВ и ТКЛР $7,23 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, который совпадает с ТКЛР оксида индия [15]. Разность энергии расширения упорядоченной и неупорядоченной фаз составляет $\phi = 0,24$ эВ. Эта величина соответствует энергии сдвига при переходе фазы типа С в фазу типа C^1 . Температура 550 °C является критической для непрерывной функции $y = f(C)$ оксида индия. При этой температуре появляется неупорядоченная фаза оксида индия типа C^1 , параметр элементарной ячейки этой фазы меньше, чем параметр решетки упорядоченной фазы (см. рис. 3). Такое уменьшение параметра элементарной ячейки кубической фазы типа C^1 можно отнести к снижению искажений кристаллической решетки при нагреве за счет смещения анионных вакансий в тетраэдрические пустоты. Экстраполяция значений параметра решетки неупорядоченной фазы типа C^1 к нулю обнаруживает совпадение с значением параметра решетки фазы типа С при 25 °C и указывает на отсутствие искажения в этой решетке, связанное с разницей радиусов кислорода и анионной вакансии. Следовательно, можно утверждать, что радиус кислорода практически совпадает с радиусом анионной вакансии, рассчитанным по методу, описанному в публикациях [13, 14]. Экспериментальные и теоретические расчеты радиуса анионной вакансии совпадают.

Фазовое превращение $C \rightarrow C^1$ можно объяснить следующей моделью. Рассмотрим упаковку атомов в структуре типа С — упорядоченной фазы оксида индия. Кислородные атомы и упорядоченные анионные вакансии образуют куб, состоящий из шести атомов кислорода и двух упорядоченных анионных вакансий, которые центрированы катионами индия или свободны. Такая конфигурация атомов решетки оксида

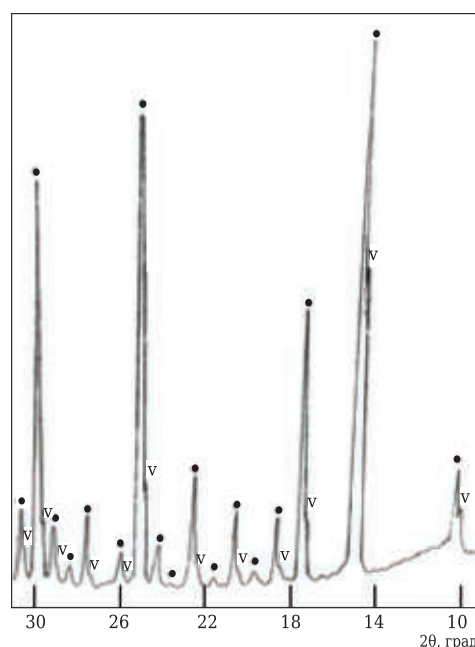


Рис. 2. Рентгенограмма оксида индия при 700 °C: v — упорядоченная фаза; • — неупорядоченная фаза

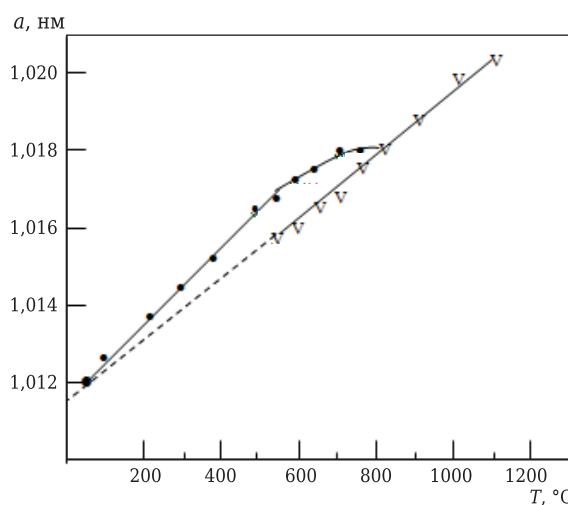


Рис. 3. Изменение параметров кристаллических решеток двух фаз в интервале 25–1100 °C: • — упорядоченная фаза типа С; v — неупорядоченная фаза типа C^1

индия существует в интервале 25–550 °C. При 550 °C появляется неупорядоченная фаза типа C^1 , в решетке которой появляются плоскости, свободные от анионных вакансий. Фрагмент структуры фазы типа С (рис. 4) показывает расположение атомов упорядоченных анионных вакансий в связке с катионами индия в плоскости (001) и в направлении [001].

При нагреве расстояния катион – анионная вакансия увеличиваются в направлении [001] и анионные вакансии начинают смещаться в сторону тетраэдрических пустот (интервал 25–550 °C). При 550 °C анионные вакансии сдвигаются в сторону тетраэдрических пустот по типу разворота, так как связь катион – анионная вакансия сохраняется, а кислород смещается в сторону

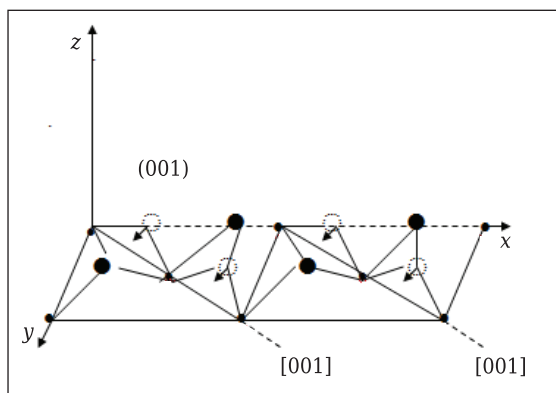


Рис. 4. Фрагмент структуры упорядоченной фазы типа С, показывающий расположение атомов индия, кислорода и упорядоченных анионных вакансий: • — атом индия; ● — атом кислорода; ○ — анионная вакансия

анионной вакансии. Возникают плоскости, свободные от анионных вакансий. Такой механизм смещения анионных вакансий приводит к появлению рентгеновских линий одинаковой интенсивности двух фаз типов С и С¹ в интервале 550–700 °С (см. рис. 1–3). При 700 °С интенсивность линий и параметр решетки упорядоченной фазы уменьшаются, сближаются с фазой типа С¹ и полностью исчезают при 800 °С — фазовый переход второго рода. Однофазная область неупорядоченной фазы типа С¹ существует в интервале 800–1100 °С. Этот процесс обратим при охлаждении образца оксида индия ниже 550 °С. Связь катион – анионная вакансия начинает сокращаться и вытягивать анионные вакансии из тетраэдрических пустот обратно в исходное положение. Фазовые превращения первого и второго рода в оксиде индия полиморфные.

Разрыв непрерывной функции для упорядоченной фазы типа С есть предел температуры, при которой наблюдается скачок ее параметра решетки при 550 °С — фазовый переход первого рода:

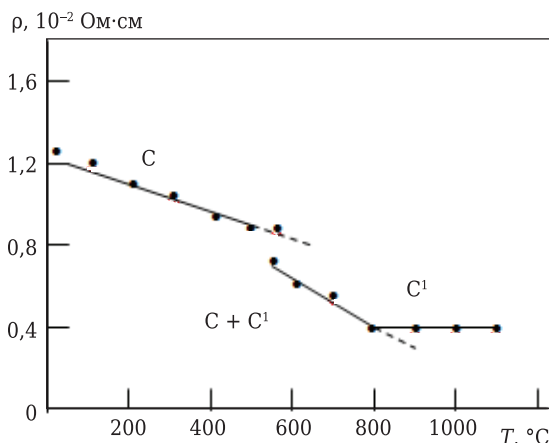


Рис. 5. Зависимость электросопротивления ρ фаз оксида индия при нагреве в интервале 25–1100 °С на воздуха: С — упорядоченная фаза; С¹ — неупорядоченная фаза

$$\lim_{t \rightarrow 550^\circ\text{C}} f(C) \rightarrow \lim_{t \rightarrow 800^\circ\text{C}} f(C + C^1) \rightarrow \lim_{t \rightarrow 1100^\circ\text{C}} f(C^1). \quad (1)$$

Переход С → С¹ в двухфазной области относится к фазовому переходу второго рода, предел этого перехода — температура 800 °С. При этой температуре параметры указанных фаз совпадают. Предел существования неупорядоченной фазы типа С¹ есть температура 1100 °С, при которой нет потери кислорода решеткой оксида индия.

Энергию ϕ фазового перехода С → С¹ можно оценить для двух состояний твердого тела при разных температурах с помощью относительной вероятности [16, 17] по формуле

$$\phi = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} k \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}, \quad (2)$$

где V_1 , V_2 — объем элементарной ячейки оксида индия при разных температурах.

Энергия термического расширения упорядоченной фазы С, определенная в интервале 25–550 °С, равна 1,48 эВ, энергия неупорядоченной фазы С¹ в интервале 550–1100 °С равна 1,24 эВ. Разница этих двух энергий составляет энергию фазового перехода С → С¹, равную 0,24 эВ, при 550 °С — энергию смещения анионных вакансий в междоузлия. Постепенный переход упорядоченной фазы в неупорядоченную сопровождается перераспределением интенсивности рентгеновских линий и сближением их при 800 °С — фазовый переход второго рода, протекающий без затраты дополнительной энергии.

При наложении электрического поля E уменьшается электросопротивление образцов оксида индия в интервале 25–550 °С в однофазной области упорядоченной фазы типа С. При 550 °С происходит уменьшение электросопротивления образцов по типу скачка, что указывает на наличие фазового превращения первого рода. Дальнейшее уменьшение электросопротивления при повышении температуры до 800 °С соответствует двухфазной области смеси фаз типов С и С¹ и остается постоянным до 1100 °С — однофазная область типа С¹ (рис. 5).

При наложении электрического поля E на кристалл скорость дрейфа дефектов меняется в направлении поля. Высота потенциального барьера изменяется на величину [17], равную

$$\Delta\phi = \pm \frac{1}{2} ZeEd \cdot 10^{11}, \quad (3)$$

где Ze — заряд анионной вакансии; d — расстояние между узлами решетки.

Вероятность W того, что за единицу времени ион перемещается в направлении поля, равна

$$W = \nu \cdot \exp\left(-\frac{\phi_0 \pm ZeEd \cdot 10^{11}}{kT\phi}\right), \quad (4)$$

где ν — частота колебаний атомов решетки; ϕ_0 — начальная разность потенциала между сосед-

ними узлами решетки. Вероятность движения носителей заряда в интервале 25–550 °С, определенная аналитически по формуле (4) и с помощью геометрической вероятности (см. рис. 3), совпадает и равна $W = 0,73$.

Средняя скорость v дрейфа носителя заряда равна

$$v \approx v \frac{ZeEd^2}{kT} \cdot \exp\left(\frac{\phi}{kT}\right) \approx \frac{Zed^2WE}{kT} \approx \mu E \approx \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (5)$$

где ϕ — энергия проводимости зарядов; K — модуль нормальной упругости среды, в которой движутся носители заряда; ρ — плотность среды.

Проводимость, обусловленная рассматриваемым механизмом, пропорциональна числу дефектов — анионных вакансий в единице объема, которые являются элементами структуры и движутся с подвижностью, равной μ :

$$\mu = \frac{v}{E}. \quad (6)$$

По формулам (5) и (6) из скорости движения анионных вакансий определяем модуль нормальной упругости: $K = 131,62$ ГПа. Коэффициент Пуассона находим как отношение поперечного уменьшения решетки при 550 °С к продольному растяжению: $\nu = 0,156$. Макронапряжение растяжения σ упорядоченной структуры типа С при нагреве находим по формуле

$$\sigma = K \cdot \nu \cdot \varepsilon_1, \quad (7)$$

где ε_1 — деформация растяжения решетки при нагреве в интервале 25–550 °С, $\varepsilon_1 = \Delta V/V$.

Напряжение растяжения для фазы типа С упорядоченной структуры $\sigma = 92$ МПа, для фазы типа С¹ неупорядоченной структуры $\sigma = 83$ МПа, модуль сдвига $G = 12,86$ ГПа.

В интервале 25–550 °С существует упорядоченная фаза типа С. Наклон прямой на этом интервале температур (см. рис. 5) соответствует ионному типу проводимости. В структуре типа С содержится 25 % анионных вакансий, которые являются элементами структуры, и смещение анионных вакансий в тетраэдрические пустоты приводит к появлению неупорядоченной фазы типа С¹. В интервале 550–800 °С существует смесь двух фаз С и С¹, наклон прямой меняется, что указывает на появление другого механизма проводимости. В структуре появляются плоскости, которые не содержат анионных вакансий; в таких плоскостях наблюдается электронная проводимость. Свободные электроны появляются в зоне проводимости с валентной зоны кислорода и 4d-состояния индия. Смешанная проводимость осуществляется смесью анионных вакансий и электронов по формуле

$$\frac{1}{\rho_2} = \left[\frac{1}{\rho_0} \cdot \exp(-\phi/kT) \right] + \frac{1}{\rho_3} = \left[\frac{1}{\rho_0} \cdot \exp(-eEd \cdot 10^{11})/e \right] / kT, \quad (8)$$

где e — заряд электрона; ε — диэлектрическая постоянная.

Исследуемые механизмы проводимости свободных носителей заряда в оксиде индия зависят от температуры (зависимости для каждого механизма прямолинейные с разными наклонами и разной длиной) и подчиняются распределению Больцмана.

Энергию ионной проводимости ϕ в интервале 25–550 °С образцов оксида индия можно определить по следующей зависимости:

$$\phi = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \cdot k \cdot \ln \frac{1/\rho_1}{1/\rho_2}, \quad (9)$$

откуда $\phi_1 = 1,44$ эВ.

В интервале 550–800 °С происходит постепенный переход ионной проводимости в электронную, что связано с фазовым переходом С → С¹ второго рода. Проводимость оксида индия в двухфазной области увеличивается с ростом температуры, и ее величину можно определить как сумму ионной и электронной проводимости. В смешанной области в интервале ($T_2 = 550$ °С) – ($T_3 = 800$ °С) в зависимости от температуры вероятность ионной проводимости уменьшается от 1 до 0, а вероятность электронной проводимости увеличивается от 0 до 1, что приводит к росту проводимости свободных носителей заряда:

$$W = [1/\rho_0 \cdot \exp(-\phi_2/kT_2)] / [1/\rho_0 \cdot \exp(-\phi_2/kT_3)] = = (1/\rho_2) / (1/\rho_3) = 1, \quad (10)$$

где ϕ_2 — энергия проводимости в двухфазной области, которую определяем по формуле

$$\phi_2 = \frac{T_2 T_3}{T_3 - T_2} \cdot k \cdot \ln \frac{1/\rho_2}{1/\rho_3}. \quad (11)$$

По формуле (11) в интервале 550–800 °С получаем $\phi_2 = 1,20$ эВ — энергию электронной проводимости, которая остается постоянной в интервале 800–1100 °С. Энергию перехода упорядоченной фазы типа С в неупорядоченную типа С¹ можно определить как разницу энергии анионной и электронной проводимости. Энергия перехода равна 0,24 эВ и совпадает с энергией скачка при термическом расширении оксида индия. Обнаруженные фазовые превращения и изменения механизмов проводимости в условиях сохранения химического состава оксида индия протекают аналогично с фазовыми превращениями и изменениями механизмов проводимости в структурных аналогах оксидов иттрия и скандия при температурах сохранения химического состава оксидов [18, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При термическом и электрическом воздействии в условиях сохранения химического состава оксида индия в интервале 25–1100 °С обнаружены фазовые превращения упорядоченной фазы типа С в неупорядоченную фазу типа С¹ при 550 °С — превращение первого рода. Это фазовое превра-

щение сопровождается уменьшением параметра кристаллической решетки, изменением механизмов проводимости свободных носителей заряда от ионной проводимости для фазы типа С в интервале 25–550 °С к смешанной (С + С¹) в интервале 550–800 °С. Фазовое превращение второго рода (С → С¹) протекает в результате сближения параметров решеток фаз типов С и С¹ без затраты энергии, с переходом в электронную проводимость. Неупорядоченная фаза типа С¹ с электронной проводимостью в интервале 800–1100 °С

сохраняется. Аналитическим и графическим методами определены размеры радиусов катиона индия, кислорода и анионной вакансии и обнаружено совпадение размеров радиуса кислорода и радиуса анионной вакансии. Фрагмент структуры атомов кубической фазы типа С в оксиде индия при нагреве и наложение электрического поля на воздухе позволили понять механизм перехода анионной проводимости в электронную. По экспериментальным данным рассчитаны механические свойства оксида индия.

Библиографический список

1. **Fan, John C. C.** Properties of Sn-doped In₂O₃ films prepared by RF-sputtering / *John C. C. Fan, Frank J. Bachner* // J. Electrochem. Soc. : Solid state science and technology. — 1975. — Vol. 122, № 12. — P. 1719–1725.
2. **Соловьева, А. Е.** Особенности взаимодействия оксида индия с SnO / *А. Е. Соловьева, В. А. Жданов* // Неорганические материалы. Изв. АН СССР. — 1985. — Т. 21, № 6. — С. 957–960.
3. **Bates, Lambert J.** Electrical conductivity, seebeck coefficient and structure of In₂O₃–SnO₂ / *J. Lambert Bates, Curtis W. Griffin, David D. Marchant, Jonn E. Garnier* // Am. Ceram. Soc. Bull. — 1986. — Vol. 65, № 4. — P. 673–678.
4. **Плоткин, С. С.** Электрические свойства керамики, содержащей ZrO₂, HfO₂, In₂O₃ / *С. С. Плоткин, В. Е. Плющев, И. А. Роздин* // Неорганические материалы. Изв. АН СССР. — 1973. — Т. 11, № 9. — С. 1709–1710.
5. **Пасынков, В. В.** Полупроводниковые приборы / *В. В. Плотников, Л. К. Чиркин*. — М. : Высшая школа, 1987. — 479 с.
6. **Шевченко, В. Я.** Техническая керамика / *В. Я. Шевченко, С. М. Баринов*. — М. : Наука, 1993. — 185 с.
7. **Громов, В. Ф.** Сенсорные свойства наноструктурированных систем на основе оксида индия, содержащих Co₃O₄ или ZrO₂ / *В. Ф. Громов, Г. Н. Герасимов, Т. В. Большова [и др.]* // Журнал химической физики. — 2018. — Т. 37, № 1. — С. 76–82.
8. **Rout, C. S.** Sensors for the nitrogen oxide NO₂, NO, N₂O based on In₂O₃ and WO₃ nano wires / *C. S. Rout, K. Ganesh, J. A. Govindara, C. N. Rao* // Apple Phys. — 2006. — Vol. 85. — P. 241–246.
9. **Соловьева, А. Е.** Свойства поликристаллического оксида индия на воздухе и в вакууме / *А. Е. Соловьева, В. А. Жданов, В. Л. Марков, Р. Р. Швангирадзе* // Неорганические материалы. Изв. АН СССР. — 1982. — Т. 18, № 5. — С. 825–828.
10. **Соловьева, А. Е.** Образование шнура проводимости и пробоя в поликристаллическом оксиде индия / *А. Е. Соловьева* // Физика и техника полупроводников. — 1992. — Т. 26, № 3. — С. 408–412.
11. **Sasaki, K.** Electronic conductivity in Ln₂O₃ in solid solution with ZrO₂ / *K. Sasaki, H. P. Seifert, L. J. Gauckler* // J. Electrochem. Soc. — 1994. — Vol. 141, № 10. — P. 275–2768.
12. **Попов, В. П.** Электропроводность и термодинамика восстановления оксида индия и твердых растворов на его основе / *В. П. Попов, Л. В. Морозова* // Журнал неорганической химии. — 1995. — Т. 40, № 1. — С. 37–41.
13. **Сухаревский, Б. Я.** Твердые растворы замещения-введения-вычитания в координационных кристаллах / *Б. Я. Сухаревский, А. М. Гавриш, А. Е. Соловьева* // АН СССР. Кристаллография. — 1980. — Т. 25, вып. 4. — С. 755–764.
14. **Соловьева, А. Е.** Образование оксидов кубической модификации с ОЦК-решеткой типа С в поликристаллических диоксидах гафния, циркония и церия при нагреве / *А. Е. Соловьева* // Новые огнеупоры. — 2021. — № 3. — С. 48–58.
15. **Самсонов, Г. В.** Физико-химические свойства окислов / *Г. В. Самсонов*. — М. : Металлургия, 1978. — 471 с.
16. **Уэрт, Ч.** Физика твердого тела / *Ч. Уэрт, Р. Томсон*. — М. : Мир, 1969. — 190 с.
17. **Постников, В. С.** Физика и химия твердого состояния / *В. С. Постников*. — М. : Металлургия, 1978. — 544 с.
18. **Solovyeva, A. E.** Modeling of the mechanism of influence of the defect structure in a polycrystalline scandium oxide on the properties of the thermal and electrical effects in vacuum / *A. E. Solovyeva* // Nonmaterials: Application and Properties. — 2013. — Vol. 2, № 4. — 04NAESP 16 (4 pp).
19. **Соловьева, А. Е.** Изучение кристаллической структуры и электрофизических свойств поликристаллического оксида иттрия при нагреве в вакууме / *А. Е. Соловьева* // Успехи прикладной физики. — 2019. — Т. 7, № 2. — С. 177–187. ■

Получено 10.06.21
© А. Е. Соловьева, 2021 г.