

## MICROSTRUCTURE AND PHYSICAL PROPERTIES OF SnO<sub>2</sub> THIN FILMS

**Madрахимов Муминжон Mukhidinovich** — Doctoral Student

**Khidirov Dadakhon Sherkozievich** — Assistant

Fergana State Technical University

**Abstract.** This article investigates the microstructure, electrical and optical properties, and gas sensitivity of AsGa-doped SnO<sub>2</sub> thin films obtained by thermal evaporation in vacuum.

**Keywords:** SnO<sub>2</sub> thin films; VUP-4; isothermal annealing; microstructure; electrical and optical properties; X-ray diffraction; electron microscopy; gas sensitivity; ultrafine particle model.

## МИКРОСТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК SnO<sub>2</sub>

**Мадрахимов Муминжон Мўйдинович** — докторант

**Хидиров Дадахон Шерқозиевич** — ассистент

Ферганский государственный технический университет

**Аннотация.** В данной статье исследованы микроструктура, электрические и оптические свойства, а также газочувствительность тонких плёнок SnO<sub>2</sub>, легированных AsGa, полученных методом термического испарения в вакууме.

**Ключевые слова:** тонкие плёнки SnO<sub>2</sub>; VUP-4; изотермический отжиг; микроструктура; электрические и оптические свойства; рентгеновская дифракция; электронная микроскопия; газочувствительность; модель сверхмалых частиц.

**Введение.** Тонкие полупроводниковые плёнки SnO<sub>2</sub> используются как чувствительные слои в интегральных газовых датчиках для мониторинга окружающей среды и определения концентрации токсичных и взрывоопасных газов в воздухе [1–3]. Взаимодействие газа с плёнкой SnO<sub>2</sub> приводит к изменению её электропроводности пропорционально концентрации газа. Основными факторами, определяющими газочувствительность, являются электрическое сопротивление плёнок, наличие и механизм переноса носителей заряда.

Поскольку рабочая температура газовых сенсоров достигает 400 °C, а плёнки SnO<sub>2</sub> получают при низких температурах, для стабилизации электрических параметров и структуры они подвергаются длительному высокотемпературному отжигу. Целью работы является изучение влияния изотермического отжига на электрические и оптические свойства, микроструктуру и газочувствительность плёнок SnO<sub>2</sub>, а также определение механизма токопереноса в плёнках SnO<sub>2</sub>, полученных методом магнетронного распыления.

**Образцы и экспериментальная методика.** Поликристаллические плёнки SnO<sub>2</sub> получали методом термического испарения (VUP) в установке VUP-4 в атмосфере Ar (25%) и O<sub>2</sub> (75%) с добавлением AsGa (3 объёма) из оловянной мишени (99,98%).

Осаждение проводилось на стеклянные подложки без их нагрева. Толщина плёнок, измеренная интерференционным микроскопом МИИ-4, составляла 1–5 мкм в зависимости от расстояния между тиглем и подложкой.

Поверхностное сопротивление измерялось методом четырёхзондового контакта с использованием установки ЦИУС-1. Концентрация свободных носителей и их подвижность определялись методом Ван-дер-Пау в диапазоне температур 20–400 °С в магнитном поле 0,63 Т. Оптические спектры пропускания, коэффициенты поглощения и энергетические параметры определялись с помощью спектрофотометра СФ-16 в диапазоне длин волн 300–1200 нм.

**Результаты и обсуждение.** Полученные плёнки имели прозрачную желтоватую окраску и гладкую поверхность, аналогичную описанной в [5] при содержании кислорода 75%. Оптические спектры показали (рис. 1), что коэффициент поглощения плёнки составляет  $(10^3\text{--}10^4)\text{ см}^{-1}$ , в то время как поглощение стеклянной подложки —  $\alpha = (2\text{--}20)\text{ см}^{-1}$ . Край собственного поглощения расположен в области (2,8–3,3) эВ.

Для оценки ширины запрещённой зоны спектры были представлены в координатах  $\alpha^2 = f(h\nu)$  (прямые переходы) и  $\alpha^{1/2} = f(h\nu)$  (непрямые переходы). Лучшая аппроксимация наблюдалась в координатах  $\alpha^{1/2} = f(h\nu)$ , где ширина запрещённой зоны  $E_g \approx 3\text{ эВ}$ , что меньше табличного значения для монокристаллов  $\text{SnO}_2$  ( $E_g \approx 3,6\text{ эВ}$ ). Это объясняется нестехиометрией и высокой концентрацией дефектных состояний, образующих «хвосты» в запрещённой зоне.

Поверхностное сопротивление свежеполученных плёнок составляло  $R_s = 10^2\text{--}10^3\text{ Ом/с}$ , однако при нагреве до 400 °С и охлаждении параметры были нестабильными. После

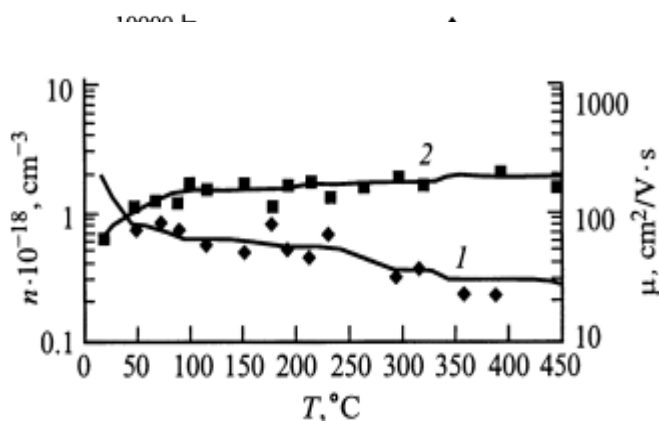


Рис. 2. Температурные зависимости концентрации (1) и подвижности (2) свободных носителей заряда в термически обработанных плёнках  $\text{SnO}_2$ .

изотермического отжига при  $T = 600\text{ °С}$  в течение 4 часов сопротивление стабилизировалось.

Измерения концентрации и подвижности носителей (рис. 2) показали, что концентрация электронов уменьшается до  $\sim 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  с ростом температуры, а подвижность растёт от 70 до  $150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $130^\circ \text{C}$  и далее остаётся почти постоянной. Такое поведение связано с взаимодействием кислородных вакансий с молекулами кислорода воздуха [8].

Рентгенодифракционный анализ (рис. 3) показал наличие только тетрагональной фазы  $\text{SnO}_2$  ( $a = 0,4760 \text{ нм}$ ,  $c = 0,3178 \text{ нм}$ ). Фазы, соответствующие AsGa, не обнаружены, что

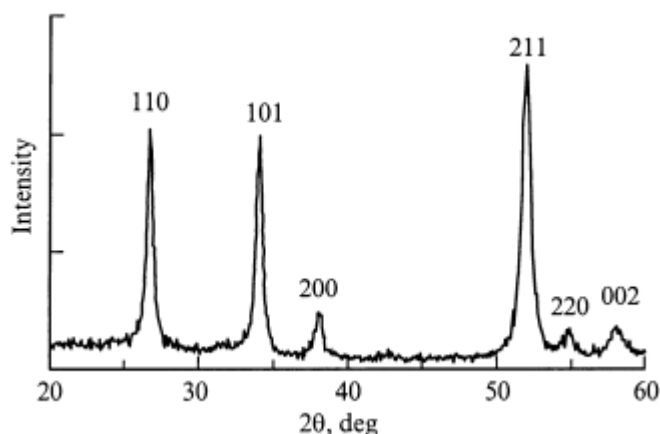


Рис. 3. Рентгеновская дифракция плёнки  $\text{SnO}_2$  после термической обработки.

может свидетельствовать о формировании твёрдого раствора замещения или внедрения. Средний размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Шеррера, составлял 11–19,4 нм.

**Заключение.** Установлены методы и параметры получения плёнок  $\text{SnO}_2$ , легированных AsGa, методом термического испарения (VUP). Для стабилизации электрических параметров выбран режим отжига  $T = 600^\circ \text{C}$ ,  $t = 4 \text{ ч}$ . Изучены структура, электрические и оптические свойства плёнок. Показано, что плёнки обладают высокой газочувствительностью и могут использоваться в качестве активного слоя твёрдотельных газовых датчиков.

## Список литературы.

1. С.И. Рембеза, Т.В. Свистова, Е.С. Рембеза, О.И. Борсякова. Микроструктура и физические свойства тонких пленок  $\text{SnO}_2$ . *Журнал «Физика» — Техника полупроводников*, №7, 2001, Т.35.
2. В.И. Стафеев, И.М. Вакулин. S-диоды // В сборнике *Полупроводниковые приборы и их применение*, 1974, Вып. 28, С. 23–56.
3. А.П. Рягузов, Р.Р. Немкаева, Н.Р. Гусейнев, Д.М. Матырбаева. Современные технологии в науке и образовании // В сборнике *СТНО-2017*, под ред. О.В. Миловзоровой (Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2017), С. 182.
4. П.В. Серёгин. Фотолюминесцентные свойства пористого кремния и методы их модификации. *Журнал «Физика» — Молодой учёный*, №10(45), октябрь 2012.
5. N.Barsan., U. Weimar. (2001). Conduction model of metal oxide gas sensors. *Journal of Electroceramics*, 7(3), 143–167.



6. A. Gurlo. (2006). Nanosensors: towards morphological control of gas *sensing activity*. *Nanotechnology*, 17(7), S27–S45.
7. G. Eranna., B. C. Joshi., D. P. Runthala., R. P. Gupta. (2004). Oxide materials for development of integrated gas sensors—A comprehensive review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 29(3–4), 111–188.