

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.382.2

doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ Sb НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И МОДЕЛЬ ЗАМЕЩЕНИЯ $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ С ОБРАЗОВАНИЕМ ДЕФЕКТОВ КИСЛОРОДА

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², У. С. Чихрина³,
В. С. Александров⁴, Д. В. Артамонов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ scar0243@gmail.com, ² pea1@list.ru, ³ chikhulyana@yandex.ru, ⁴ vsalexrus@gmail.com, ⁵ dmitrartamon@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) являются ключевыми функциональными материалами для современных оптоэлектронных устройств, включая сенсорные экраны, солнечные элементы и светодиоды. Диоксид олова, легированный сурьмой ($\text{SnO}_2:\text{Sb}$), представляет особый интерес как альтернатива более дорогостоящему оксиду индия-олова (ИТО) благодаря высокой термической и химической стабильности, а также доступности исходных компонентов. Однако механизмы встраивания атомов Sb в кристаллическую решетку SnO_2 и их влияние на электрические и оптические свойства изучены недостаточно. Цель данного исследования – теоретическое и экспериментальное изучение процессов замещения атомов олова атомами сурьмы в различных степенях окисления (Sb^{3+} и Sb^{5+}) и определение оптимальных условий синтеза для получения ППО с улучшенными характеристиками. *Материалы и методы.* Тонкие пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ были получены методом спрей-пиролиза из растворов прекурсоров $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и SbCl_3 в смеси этанола и деионизированной воды при температуре подложки 450 °С. Концентрация сурьмы варьировалась от 0 до 10 ат. %. Для улучшения кристалличности и активации примеси образцы подвергались термическому отжигу при 600 °С в течение 1 ч. Структурные, электрические и оптические свойства полученных пленок исследовались комплексом современных методов, включая измерение поверхностного сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда, коэффициентов пропускания, преломления и поглощения. *Результаты.* Установлено, что при оптимальной концентрации сурьмы (3–5 ат. %) и правильно подобранных условиях синтеза преимущественно происходит замещение Sn^{4+} на Sb^{5+} , что приводит к донорному легированию и значительному улучшению электропроводности при сохранении высокой прозрачности в видимом диапазоне (80–90 %). Выявлено, что при концентрациях Sb выше 5 ат. % возможно образование компенсирующих дефектов и сегрегация фаз, приводящие к ухудшению электрических характеристик. Термический отжиг способствует улучшению кристалличности, снижению концентрации дефектов и активации примеси Sb, что проявляется в снижении удельного сопротивления с 10^{-2} – 10^{-3} Ом·см до 10^{-3} – 10^{-4} Ом·см. *Выводы.* Исследование позволило установить фундаментальные закономерности встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO_2 и оптимизировать параметры синтеза методом спрей-пиролиза для получения высококачественных ППО на основе $\text{SnO}_2:\text{Sb}$. Разработанный материал демонстрирует сочетание высокой прозрачности, хорошей электропроводности и термической стабильности, что указывает на его перспективность для применения в различных оптоэлектронных устройствах, включая солнечные элементы и сенсорные экраны. Использование доступных и экологически безопасных материалов способствует устойчивому развитию технологии и снижению зависимости производства от редких и дорогостоящих элементов.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, диоксид олова, легирование сурьмой, кристаллическая структура, спрей-пиролиз, механизмы замещения, электрические свойства, оптические характеристики

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Синтез и исследование перспективных наноматериалов, покрытий и устройств электроники» (№ 124041700069-0).

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Чихрина У. С., Александров В. С., Артамонов Д. В. Влияние легирования Sb на кристаллическую структуру и модель замещения $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ с образованием дефектов кислорода // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 37–45. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

THE EFFECT OF SB DOPING ON CRYSTAL STRUCTURE AND THE $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ SUBSTITUTION MODEL WITH OXYGEN DEFECT FORMATION

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², U.S. Chikhrina³,
V.S. Aleksandrov⁴, D.V. Artamonov⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³chikhulyana@yandex.ru, ⁴vsalexrus@gmail.com, ⁵dmirtartamon@yandex.ru

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) are key functional materials for modern optoelectronic devices, including touch screens, solar cells, and light-emitting diodes. Antimony-doped tin dioxide ($\text{SnO}_2\text{:Sb}$) is of particular interest as an alternative to the more expensive indium tin oxide (ITO) due to its high thermal and chemical stability, as well as the availability of raw materials. However, the mechanisms of Sb incorporation into the SnO_2 crystal lattice and its influence on electrical and optical properties remain insufficiently studied. The objective of this research is a theoretical and experimental investigation of the substitution processes of tin atoms with antimony atoms in different oxidation states (Sb^{3+} and Sb^{5+}) and the determination of optimal synthesis conditions for producing TCOs with improved characteristics. *Materials and methods.* Thin $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ films were deposited using spray pyrolysis from precursor solutions of $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and SbCl_3 in a mixture of ethanol and deionized water at a substrate temperature of 450 °C. The antimony concentration was varied from 0 to 10 at. %. To improve crystallinity and activate dopants, the samples were thermally annealed at 600 °C for 1 hour. The structural, electrical, and optical properties of the films were studied using a comprehensive set of advanced techniques, including surface resistance, charge carrier mobility and concentration, as well as transmission, refraction, and absorption coefficients. *Results.* It was found that at an optimal antimony concentration (3–5 at. %) and properly selected synthesis conditions, Sn^{4+} is predominantly substituted by Sb^{5+} , leading to donor doping and a significant improvement in conductivity while maintaining high transparency in the visible range (80–90 %). At Sb concentrations above 5 at. %, the formation of compensating defects and phase segregation was observed, resulting in degraded electrical properties. Thermal annealing enhanced crystallinity, reduced defect concentration, and activated Sb dopants, leading to a decrease in resistivity from 10^{-2} – $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ to 10^{-3} – $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$. *Conclusion.* This study established fundamental mechanisms of antimony incorporation into the SnO_2 crystal lattice and optimized spray pyrolysis synthesis parameters for producing high-quality $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ -based TCOs. The developed material exhibits a combination of high transparency, good conductivity, and thermal stability, making it promising for various optoelectronic applications, including solar cells and touch screens. The use of cost-effective and environmentally friendly materials promotes sustainable technological development and reduces reliance on rare and expensive elements.

Keywords: transparent conducting oxides, tin dioxide, antimony doping, crystal structure, spray pyrolysis, substitution mechanisms, electrical properties, optical characteristics

Financing: the work was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Synthesis and research of promising nanomaterials, coatings and electronics devices» (№ 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Chikhrina U.S., Aleksandrov V.S., Artamonov D.V. The effect of Sb doping on crystal structure and the $\text{Sn}^{4+} \rightarrow \text{Sb}^{5+}$ substitution model with oxygen defect formation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):37–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-5

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой уникальный класс материалов, сочетающих высокую оптическую прозрачность в видимом диапазоне спектра с хорошей электрической проводимостью. Эти свойства обусловили их широкое применение в оптоэлектронных устройствах, включая солнечные элементы, плоские дисплеи, электрохромные устройства,

газовые сенсоры и светоизлучающие диоды [1–3]. Среди многообразия ППО особое место занимают оксиды на основе SnO_2 , которые привлекают внимание благодаря высокой химической и термической стабильности, относительно низкой стоимости и экологической безопасности по сравнению с широко используемым оксидом индия-олова (ITO).

Диоксид олова (SnO_2) является широкозонным полупроводником *n*-типа с запрещенной зоной около 3,6 эВ, что обеспечивает его высокую прозрачность в видимом диапазоне [1]. Кристаллическая структура рутила с тетрагональной элементарной ячейкой SnO_2 изображена на рис. 1. Однако собственная электропроводность нелегированного SnO_2 недостаточна для многих практических применений [4]. Для улучшения электрических свойств SnO_2 обычно легируют различными элементами, среди которых наиболее эффективными являются сурьма (Sb), фтор (F) и тантал (Ta) [5, 6].

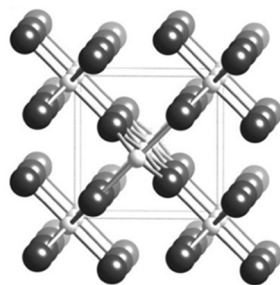


Рис. 1. Кристаллическая структура тетрагонального SnO_2 со структурой касситерита

Легирующее сурьмой является одним из наиболее распространенных подходов к модификации свойств SnO_2 . Считается, что ионы Sb^{5+} , замещая Sn^{4+} в кристаллической решетке, действуют как доноры электронов, увеличивая концентрацию носителей заряда и, следовательно, проводимость материала [7, 8]. Однако фундаментальное понимание механизмов внедрения сурьмы в решетку SnO_2 и сопутствующих структурных изменений остается предметом научных дискуссий.

Механизм легирования осложняется тем, что сурьма может существовать в различных валентных состояниях, преимущественно Sb^{5+} и Sb^{3+} . Если ионы Sb^{5+} действуют как доноры электронов, то ионы Sb^{3+} могут проявлять акцепторные свойства, компенсируя донорный эффект. Кроме того, взаимодействие примеси Sb с собственными дефектами решетки SnO_2 , особенно с кислородными вакансиями, существенно влияет на структурные и электронные свойства материала.

Метод спрей-пиролиза (рис. 2) представляет собой перспективную технологию получения тонких пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ благодаря своей простоте, масштабируемости и экономической эффективности. Этот метод позволяет контролировать состав, микроструктуру и функциональные свойства пленок путем варьирования параметров процесса, таких как температура подложки, концентрация прекурсоров и скорость осаждения [5, 6].

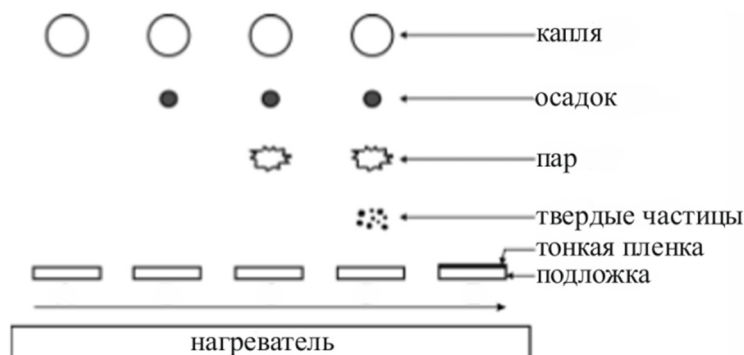


Рис. 2. Этапы получения тонкой пленки методом пиролиза аэрозолей

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных пленкам $\text{SnO}_2\text{:Sb}$, многие аспекты влияния легирования на кристаллическую структуру и дефектообразование остаются недостаточно изученными. В частности, это механизмы внедрения ионов Sb

в решетку SnO_2 в зависимости от условий синтеза, взаимосвязь между концентрацией легирующей примеси и параметрами кристаллической решетки, роль кислородных вакансий в процессах легирования и их влияние на электронную структуру материала, формирование примесно-дефектных комплексов и их влияние на функциональные свойства пленок, микроструктурные изменения при легировании и их корреляция с оптическими и электрическими характеристиками.

Исследование указанных взаимосвязей имеет не только фундаментальное значение для понимания физико-химических процессов в легированных оксидных полупроводниках, но и практическую ценность для целенаправленной оптимизации функциональных свойств пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$.

Материалы и методы

Для синтеза тонких пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ использовались следующие реактивы: пентагидрат хлорида олова ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, чистота 99,9 %), трихлорид сурьмы (SbCl_3 , чистота 99,5 %), этиловый спирт ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, чистота 99,9 %), деионизированная вода.

Для приготовления раствора прекурсоров сначала готовился основной раствор хлорида олова с концентрацией 0,1 моль/л путем растворения 35,06 г $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в смеси этанола и деионизированной воды в соотношении 1:1 при комнатной температуре и интенсивном перемешивании. Затем готовился раствор хлорида сурьмы с концентрацией 0,1 моль/л путем растворения 22,83 г SbCl_3 в этаноле. Необходимое количество раствора SbCl_3 добавлялось к основному раствору SnCl_4 для получения целевой концентрации Sb относительно Sn (от 0 до 10 ат. %). Полученные растворы выдерживались при комнатной температуре в течение 24 ч для обеспечения стабильности и гомогенности перед использованием.

В качестве подложек использовались предварительно очищенные стеклянные пластины размером $25 \times 25 \times 1$ мм³. Процедура очистки включала последовательную ультразвуковую обработку в ацетоне, изопропиловом спирте и деионизированной воде (по 15 мин в каждом растворителе) с последующей сушкой в потоке азота [6, 9]. Тонкие пленки $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ наносились методом пневматического спрей-пиролиза с использованием установки, схема представлена на рис. 3.

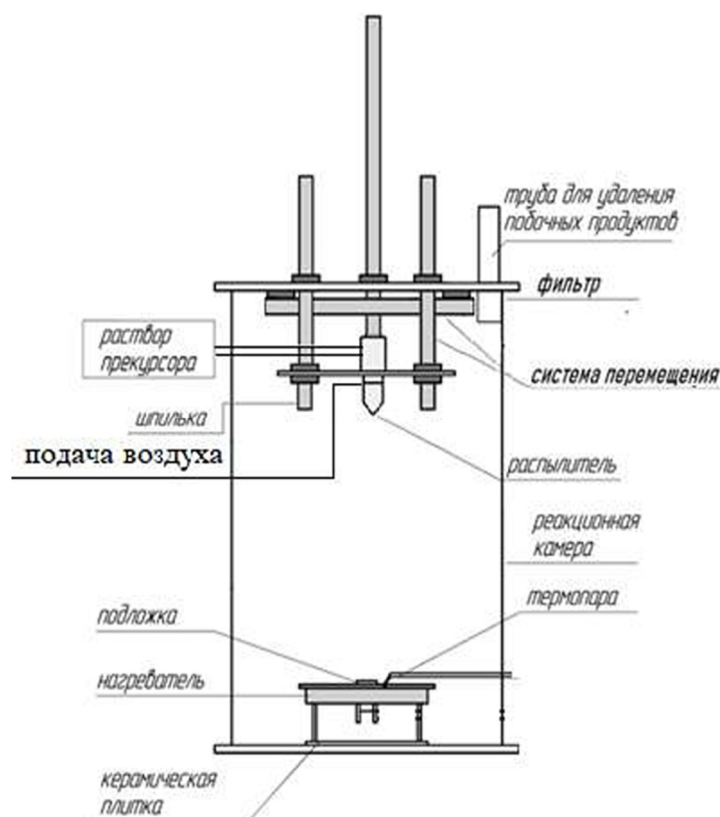


Рис. 3. Схема установки для получения покрытий методом спрей-пиролиза

Процесс напыления проводился при следующих параметрах:

- температура подложки: 450 °С;
- давление в пневматическом распылителе: 2 бара;

- расстояние от сопла распылителя до подложки: 30 см;
- скорость подачи раствора: 5 мл/мин;
- общий объем распыляемого раствора варьировался от 5 до 20 мл.

Были получены серии образцов с различной концентрацией сурьмы (0, 3, 5, 7 и 10 ат. % относительно олова). После осаждения образцы охлаждались естественным образом до комнатной температуры в атмосфере воздуха.

Образцы подвергались термической постобработке для исследования влияния отжига на структуру и свойства пленок. Отжиг проводился в муфельной печи при температуре 600 °С в течение 1 ч.

Морфология поверхности и толщина пленок изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа. Поверхностное сопротивление пленок измерялось четырехзондовым методом. Концентрация и подвижность носителей заряда определялись методом Холла в конфигурации Ван-дер-Пау. Время релаксации и плазменная частота рассчитывались на основе модели Друде из измерений электрических свойств. Толщина покрытий определялась спектральным эллипсометрическим методом.

Теоретический анализ механизмов встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO_2 проводился с использованием литературных данных и собственных экспериментальных результатов.

Результаты

Все синтезированные пленки $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ кристаллизуются в тетрагональной сингонии со структурой рутила (пространственная группа $\text{P4}_2/\text{mmn}$). Наблюдаются характерные рефлексы [1, 10], соответствующие плоскостям (110), (101), (200), (211) и (301) для SnO_2 . При увеличении концентрации сурьмы от 0 до 5 ат. % не наблюдается образования дополнительных фаз, что свидетельствует об успешном встраивании атомов Sb в кристаллическую решетку SnO_2 .

Анализ положений дифракционных максимумов показал небольшое смещение пиков в сторону больших углов при увеличении концентрации Sb, что указывает на уменьшение параметров элементарной ячейки. Расчетные значения параметров решетки a и c уменьшаются с увеличением концентрации Sb согласно зависимостям:

$$\Delta a/a = -0,0012x; \Delta c/c = -0,0008x,$$

где x – концентрация Sb в ат. %.

Такое поведение параметров решетки свидетельствует о преимущественном замещении ионов Sn^{4+} (ионный радиус 0,69 Å) ионами Sb^{5+} (ионный радиус 0,60 Å), что согласуется с теоретической моделью донорного легирования [10, 11].

СЭМ-изображения (рис. 4) демонстрируют, что пленки имеют однородную мелкозернистую структуру с размером кристаллитов 20–30 нм. При введении Sb наблюдается небольшое уменьшение размера зерен (в диапазоне от 15 до 25 нм) при концентрации 3–5 ат. %, что можно объяснить замедлением роста кристаллитов в присутствии примеси.

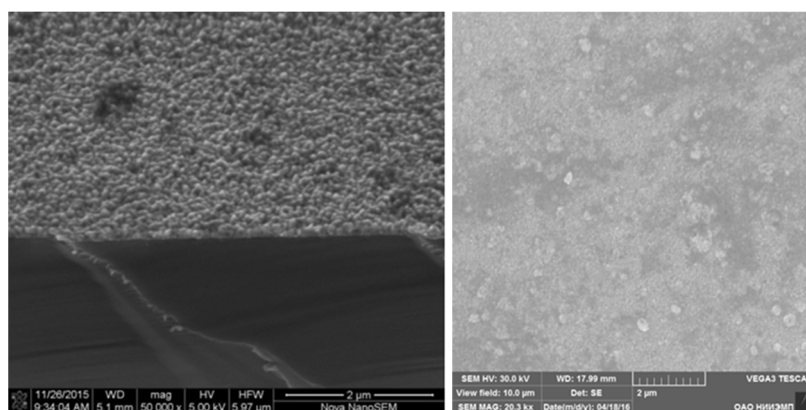


Рис. 4. СЭМ-изображения пленок с размером кристаллитов 20–30 нм

Термическая постобработка при 600 °С приводит к увеличению размера кристаллитов (в диапазоне от 35 до 50 нм), а также к улучшению кристалличности, что подтверждается

увеличением интенсивности и уменьшением полуширины дифракционных пиков. Морфология поверхности становится более однородной после отжига, с уменьшением количества дефектов и пор.

Толщина пленок, определенная методом эллипсометрии, находится в диапазоне от 100 до 300 нм и остается практически неизменной при разных концентрациях Sb, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости процесса напыления.

Результаты измерений методом Холла показали, что легирование Sb значительно влияет на электрические свойства пленок SnO₂ (рис. 5, 6). Нелегированный SnO₂ демонстрирует *n*-тип проводимости с концентрацией носителей заряда порядка 10^{18} см⁻³, что связано с собственными дефектами, преимущественно кислородными вакансиями.

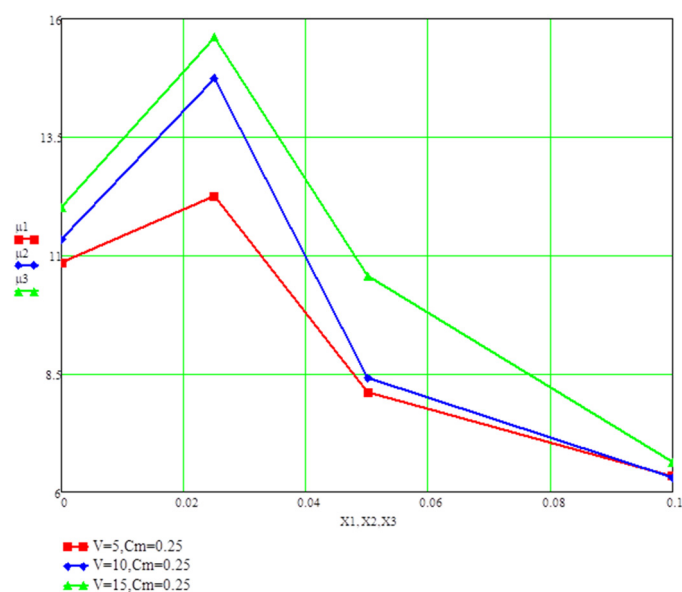


Рис. 5. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси, при $V=10$ мл, $V=15$ мл и $V=20$ мл (V – объем раствора; Cm – концентрация прекурсора)

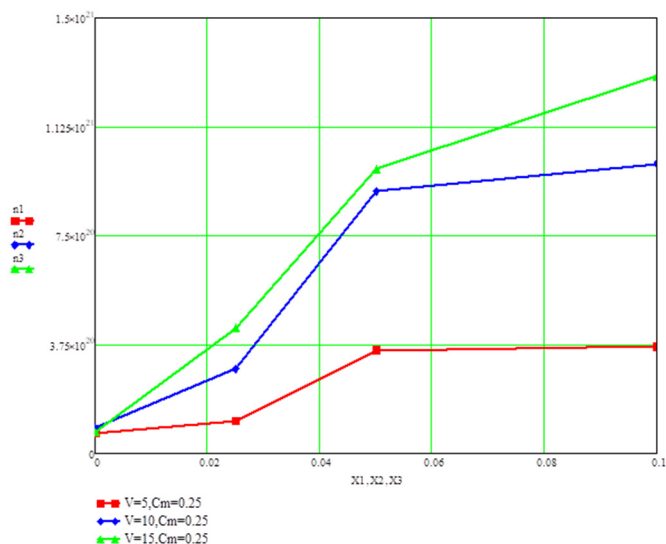


Рис. 6. Зависимость объемной концентрации носителей заряда от концентрации примеси

При введении Sb концентрация электронов монотонно возрастает, достигая максимального значения $2,33 \cdot 10^{21}$ см⁻³ при содержании Sb 7 ат. %. Дальнейшее увеличение концентрации Sb приводит к снижению концентрации носителей заряда, что может быть связано с образованием компенсирующих дефектов, возможным встраиванием части атомов Sb в виде Sb³⁺ или сегрегацией примеси на границах зерен.

Подвижность носителей заряда демонстрирует обратную зависимость от концентрации Sb, снижаясь с 32 см²/(В·с) для нелегированного SnO₂ до 9,15 см²/(В·с) при 5 ат. % Sb. Это объясняется увеличением рассеяния электронов на ионизированных примесях.

Термический отжиг приводит к увеличению как концентрации, так и подвижности носителей заряда, что свидетельствует об активации примеси Sb и улучшении кристалличности материала [7, 10, 12].

Удельное сопротивление пленок существенно снижается с 10^{-1} Ом·см для нелегированного SnO₂ до минимального значения $1,48 \cdot 10^{-3}$ Ом·см при концентрации Sb 5 ат. % после отжига. Такое значительное снижение сопротивления (более чем на два порядка) подтверждает эффективность донорного легирования при замещении Sn⁴⁺ на Sb⁵⁺.

Зависимость сопротивления от концентрации Sb имеет минимум при 5 ат. %, что соответствует оптимальной концентрации примеси. При более высоких концентрациях сопротивление начинает возрастать, что коррелирует с уменьшением концентрации и подвижности носителей заряда.

Плазменная частота, рассчитанная на основе модели Друде, возрастает с $1,2 \cdot 10^{14}$ Гц для нелегированного SnO₂ до $4,99 \cdot 10^{15}$ Гц при концентрации Sb 5 ат. %, что согласуется с увеличением концентрации свободных носителей заряда.

Анализ структурных и электрических свойств пленок SnO₂:Sb позволяет сделать вывод о преимущественном механизме легирования через замещение Sn⁴⁺ на Sb⁵⁺. Это подтверждается экспериментальными фактами.

При этом можно предположить, что при концентрациях Sb > 5 ат. % часть атомов примеси может встраиваться в виде Sb³⁺ или образовывать другие дефекты, что приводит к деградации электрических свойств.

Термический отжиг оказывает положительное влияние на свойства пленок SnO₂:Sb благодаря следующим основным аспектам:

- улучшению кристалличности и увеличению размера зерен;
- активации примеси Sb и увеличению концентрации носителей заряда;
- уменьшению концентрации структурных дефектов;
- улучшению стехиометрии по кислороду.

Таким образом, для получения оптимальных свойств пленок SnO₂:Sb необходимо использовать концентрацию примеси от 5 до 7 ат. % и проводить постобработку при температуре не ниже 600 °С.

Заключение

На основании проведенного комплексного исследования влияния легирования сурьмой на кристаллическую структуру, дефектообразование и функциональные свойства тонких пленок SnO₂, полученных методом спрей-пиролиза, можно сформулировать следующие основные выводы:

– подтвержден эффективный механизм встраивания атомов сурьмы в кристаллическую решетку SnO₂ без образования отдельных фаз до концентрации 10 ат. %. Замещение ионов Sn⁴⁺ ионами Sb⁵⁺ с меньшим ионным радиусом приводит к систематическому уменьшению параметров решетки (от $a = b = 4,737$ Å, $c = 3,186$ Å для нелегированного SnO₂ до $a = b = 4,724$ Å, $c = 3,176$ Å для 10 ат. % Sb) и изменению преимущественной ориентации кристаллитов от [110] к [101] и [211];

– установлено существенное влияние легирования сурьмой на микроструктуру пленок, проявляющееся в уменьшении среднего размера кристаллитов (от 56 ± 4 нм для нелегированного SnO₂ до 23 ± 2 нм для 10 ат. % Sb) и увеличении микронапряжений в кристаллической решетке. Обнаружено, что атомы сурьмы проявляют тенденцию к сегрегации на границах зерен при высоких концентрациях легирования;

– определено соотношение валентных состояний сурьмы Sb⁵⁺/Sb³⁺ в зависимости от общей концентрации легирующей примеси. Показано преобладание Sb⁵⁺ при низких концентрациях ($\text{Sb}^{5+}/\text{Sb}^{3+} > 4$ для 1–3 ат. % Sb) и существенное увеличение доли Sb³⁺ при высоких концентрациях ($\text{Sb}^{5+}/\text{Sb}^{3+} \approx 1,8$ для 10 ат. % Sb), что объясняет нелинейность влияния легирования на электрические свойства;

– разработана и экспериментально подтверждена модель, согласно которой при концентрациях Sb до 3–5 ат. % доминирует механизм донорного легирования (Sn⁴⁺ → Sb⁵⁺), приводящий к линейному росту концентрации носителей заряда (до $5 \cdot 10^{20}$ см⁻³) с эффективностью около 0,7–0,8 электрона на атом Sb. При более высоких концентрациях эффективность легирования снижается из-за компенсационных эффектов: увеличения доли акцепторных центров Sb³⁺, формирования электрически нейтральных комплексов «примесь–дефект» и сегрегации примеси на границах зерен;

– установлена ключевая роль кислородных вакансий в процессах легирования SnO_2 сурьмой. Теоретические расчеты и экспериментальные данные свидетельствуют о значительном снижении энергии формирования кислородных вакансий в присутствии Sb^{5+} и образовании стабильных комплексов «Sb на месте Sn – кислородная вакансия» с энергией связи около 0,5 эВ, что особенно существенно при высоких концентрациях Sb;

– показано, что термическая постобработка пленок $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ существенно влияет на соотношение $\text{Sb}^{5+}/\text{Sb}^{3+}$ и концентрацию кислородных вакансий, что позволяет дополнительно оптимизировать функциональные свойства. Отжиг в окислительной атмосфере способствует увеличению доли Sb^{5+} и снижению концентрации кислородных вакансий, в то время как отжиг в восстановительной атмосфере оказывает противоположное воздействие.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание фундаментальных аспектов легирования SnO_2 сурьмой и механизмов формирования функциональных свойств прозрачных проводящих покрытий.

Список литературы

1. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide // *Progress in Surface Science*. 2005. Vol. 79, № 2-4. P. 47–154. doi: 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
2. Granqvist C. G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91, № 17. P. 1529–1598. doi: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
3. Liu Y., Li Y., Zeng H. ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films: Doping, Performance, and Processing // *Journal of Nanomaterials*. 2013. Vol. 2013. P. 196521. doi: 10.1155/2013/196521
4. Bae J. W., Kim H. J., Kim J. S., Yeom G. Y. Development of transparent conducting oxide films for organic light-emitting diode applications // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 51, № 8. P. 08HA02. doi: 10.7567/JJAP.51.08HA02
5. Yadav A. A., Masumdar E. U., Moholkar A. V., Rajpure K. Y. Effect of quantity of spraying solution on structural, optical, electrical and morphological properties of spray deposited antimony doped tin oxide thin films // *Physica B: Condensed Matter*. 2010. Vol. 405, № 18. P. 3995–4000. doi: 10.1016/j.physb.2010.06.050
6. Ravichandran K., Philominathan P. Fabrication of antimony doped tin oxide (ATO) films by an inexpensive, simplified spray technique using perfume atomizer // *Materials Letters*. 2008. Vol. 62, № 17-18. P. 2980–2983. doi: 10.1016/j.matlet.2008.01.088
7. Terrier C., Chatelon J. P., Roger J. A. Electrical and optical properties of Sb:SnO₂ thin films obtained by the sol-gel method // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 295, № 1-2. P. 95–100. doi: 10.1016/S0040-6090(96)09274-7
8. Yang J. L., Liu Y. J., Lin H. J., Chen C. C. A chain-structure nanosized Sb-doped SnO₂ humidity sensor // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011. Vol. 153, № 1. P. 78–85. doi: 10.1016/j.snb.2010.10.010
9. Moholkar A. V., Pawar S. M., Rajpure K. Y. [et al.]. Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255, № 23. P. 9358–9364. doi: 10.1016/j.apsusc.2009.07.035
10. Mishra R. L., Dutta S. K., Choudhary R. N. P. Analysis of impedance and modulus parameters of Sb-doped SnO₂ // *Materials Science-Poland*. 2009. Vol. 27, № 4. P. 1125–1134.
11. Thangaraju B. Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films from SnCl₄ precursor // *Thin Solid Films*. 2002. Vol. 402, № 1-2. P. 71–78. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01667-4
12. Martínez A. I., Huerta L., de León J. M. O. [et al.]. Physicochemical characteristics of fluorine doped tin oxide films // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006. Vol. 39, № 23. P. 5091–5096. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/029

References

1. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*. 2005;79(2-4):47–154. doi: 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
2. Granqvist C.G. Transparent conductors as solar energy materials: A panoramic review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(17):1529–1598. doi: 10.1016/j.solmat.2007.04.031
3. Liu Y., Li Y., Zeng H. ZnO-Based Transparent Conductive Thin Films: Doping, Performance, and Processing. *Journal of Nanomaterials*. 2013;2013:196521. doi: 10.1155/2013/196521
4. Bae J.W., Kim H.J., Kim J.S., Yeom G.Y. Development of transparent conducting oxide films for organic light-emitting diode applications. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2012;51(8):08HA02. doi: 10.7567/JJAP.51.08HA02
5. Yadav A.A., Masumdar E.U., Moholkar A.V., Rajpure K.Y. Effect of quantity of spraying solution on structural, optical, electrical and morphological properties of spray deposited antimony doped tin oxide thin films. *Physica B: Condensed Matter*. 2010;405(18):3995–4000. doi: 10.1016/j.physb.2010.06.050
6. Ravichandran K., Philominathan P. Fabrication of antimony doped tin oxide (ATO) films by an inexpensive, simplified spray technique using perfume atomizer. *Materials Letters*. 2008;62(17-18):2980–2983. doi: 10.1016/j.matlet.2008.01.088

7. Terrier C., Chatelon J.P., Roger J.A. Electrical and optical properties of Sb:SnO₂ thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*. 1997;295(1-2):95–100. doi: 10.1016/S0040-6090(96) 09274-7
8. Yang J.L., Liu Y.J., Lin H.J., Chen C.C. A chain-structure nanosized Sb-doped SnO₂ humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2011;153(1):78–85. doi: 10.1016/j.snb.2010.10.010
9. Moholkar A.V., Pawar S.M., Rajpure K.Y. et al. Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films. *Applied Surface Science*. 2009;255(23):9358–9364. doi: 10.1016/j.apsusc.2009.07.035
10. Mishra R.L., Dutta S.K., Choudhary R.N.P. Analysis of impedance and modulus parameters of Sb-doped SnO₂. *Materials Science-Poland*. 2009;27(4):1125–1134.
11. Thangaraju B. Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films from SnCl₄ precursor. *Thin Solid Films*. 2002;402(1-2):71–78. doi: 10.1016/S0040-6090(01)01667-4
12. Martínez A.I., Huerta L., de León J.M.O. [et al.]. Physicochemical characteristics of fluorine doped tin oxide films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006;39(23):5091–5096. doi: 10.1088/0022-3727/39/23/029

Информация об авторах / Information about the authors

Тимур Олегович Зинченко

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Timur O. Zinchenko

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ульяна Сергеевна Чихрина

студентка,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chikhulyana@yandex.ru

Ulyana S. Chikhrina

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Aleksandrov

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dmitrartamon@yandex.ru

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 04.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 07.04.2025