

Исследование электронных и оптических свойств тонкопленочных покрытий на основе SnO₂:Sb

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², В. Д. Кревчик³, С. В. Коновалов⁴,
Д. В. Артамонов⁵, С. А. Гурин⁶, М. Д. Новичков⁷, А. Макиевский⁸

^{1,2,3,4,5,6,7} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁴ Сибирский государственный индустриальный университет,
Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, Россия

⁸ SINTERFACE Technologies, Берлин, Германия

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³physics@pnzgu.ru,
⁴konovalov@sibsiu.ru, ⁵dva@pnzgu.ru, ⁶teslananoel@rambler.ru,
⁷novichkov1998maks@gmail.com, ⁸a.makievski@sinterface.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прозрачные проводящие оксиды (ППО) на основе диоксида олова (SnO₂), легированного сурьмой (Sb), представляют значительный интерес для современных технологий благодаря уникальному сочетанию высокой прозрачности в видимом диапазоне и хорошей электрической проводимости. Такие материалы широко применяются в оптоэлектронике, солнечных элементах и сенсорных устройствах. Однако для оптимизации их свойств необходимо глубокое понимание механизмов переноса заряда, что может быть достигнуто с использованием классической теории Друде. Целью данной работы является анализ на основе теории Друде электронных и оптических свойств тонкопленочных покрытий SnO₂:Sb, полученных методом спрей-пиролиза, а также исследование влияния концентрации носителей заряда и подвижности на проводимость и плазменную частоту. *Материалы и методы.* Тонкопленочные покрытия SnO₂:Sb получены методом спрей-пиролиза на стеклянных подложках. Концентрация носителей заряда n определялась с помощью эффекта Холла, а удельное сопротивление измерялось четырехточечным методом. Для анализа электрофизических свойств использована классическая теория Друде, которая позволила рассчитать подвижность носителей, время релаксации и плазменную частоту. Оптические свойства исследовались с использованием спектроскопии в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. *Результаты.* Проводимость пленок SnO₂:Sb варьируется в диапазоне от 10^3 до 10^4 См/м в зависимости от степени легирования сурьмой. Подвижность носителей заряда находится в диапазоне от $4,83 \cdot 10^{-4}$ до $15,91 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с). Плазменная частота принадлежит диапазону от $1,19 \cdot 10^{14}$ до $7,94 \cdot 10^{14}$ рад/с, что соответствует длинам волн от 378 до 2520 нм. Пленки SnO₂:Sb демонстрируют высокую прозрачность (более 80 %) в видимом диапазоне для образцов с низкой концентрацией носителей. С увеличением концентрации носителей наблюдается сдвиг плазменной частоты в ультрафиолетовую область, что приводит к снижению прозрачности в видимом диапазоне. Дрейфовая скорость линейно возрастает с увеличением напряжения (U) и уменьшается с увеличением расстояния (d) между контактами. Для образцов с высокой подвижностью дрейфовая скорость достигает значений $13,25 \cdot 10^{-4}$ при $U = 5$ мВ и $d = 5$ мм. *Выводы.* На основе теории Друде выполнен анализ электрофизических и оптических свойств тонкопленочных покрытий SnO₂:Sb, что позволило установить возможность оптимизации проводимости и прозрачности материала посредством варьирования степени легирования сурьмой. Показано, что дрейфовая скорость носителей заряда зависит от подвижности, напряжения и геометрии образца. Это открывает возможности для проектирования

устройств с улучшенными характеристиками. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования SnO₂:Sb в оптоэлектронных устройствах, где требуется сочетание высокой прозрачности и проводимости.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, спрей-пиролиз теория Друде, теория свободных электронов, перенос заряда, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда, плазменная частота

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

Для цитирования: Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кревчик В. Д., Коновалов С. В., Артамонов Д. В., Гурин С. А., Новичков М. Д., Макиевский А. Исследование электронных и оптических свойств тонкопленочных покрытий на основе SnO₂:Sb // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2025. № 1. С. 81–92. doi: 10.21685/2072-3040-2025-1-7

Investigation of the electronic and optical properties of thin-film coatings based on SnO₂:Sb

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², V.D. Krevchik³, S.V. Konovalov⁴,
D.V. Artamonov⁵, S.A. Gurin⁶, M.D. Novichkov⁷, A. Makievski⁸

^{1,2,3,4,5,6,7}Penza State University, Penza, Russia

⁴Siberian State Industrial University,

Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Russia

⁸SINTERFACE Technologies, Berlin, Germany

¹scar0243@gmail.com, ²pea1@list.ru, ³physics@pnzgu.ru,

⁴konovalov@sibsiu.ru, ⁵dva@pnzgu.ru, ⁶teslananoel@rambler.ru,

⁷novichkov1998maks@gmail.com, ⁸a.makievski@sinterface.com

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) based on tin dioxide (SnO₂) doped with antimony (Sb) are of significant interest for modern technologies due to their unique combination of high transparency in the visible range and good electrical conductivity. Such materials are widely used in optoelectronics, solar cells, and sensor devices. However, optimizing their properties requires a deep understanding of charge transport mechanisms, which can be achieved using the classical Drude theory. The purpose of this work is to apply the Drude theory to analyze the electronic and optical properties of SnO₂:Sb thin films obtained by spray pyrolysis, as well as to investigate the influence of charge carrier concentration and mobility on conductivity and plasma frequency. *Materials and methods.* Thin films of SnO₂:Sb were deposited on glass substrates using the spray pyrolysis method. The charge carrier concentration n was determined using the Hall effect, and the resistivity was measured using the four-point probe method. The classical Drude theory was used to analyze the electronic properties, allowing the calculation of carrier mobility, relaxation time, and plasma frequency. Optical properties were investigated using spectroscopy in the visible and near-infrared ranges. *Results.* The conductivity σ of SnO₂:Sb films varied in the range of 10^3 – 10^4 S/m depending on the antimony doping level. The carrier mobility ranged from $4.83 \cdot 10^{-4}$ to $15.91 \cdot 10^{-4}$ m²/(V·s). The plasma frequency was in the range of $1.19 \cdot 10^{14}$ to $7.94 \cdot 10^{14}$ rad/s, corresponding to wavelengths from 378 nm to 2520 nm. The SnO₂:Sb films demonstrated high transparency in the visible range (over 80%) for samples with low carrier concentration. With increasing carrier concentration, a shift in the plasma frequency toward the ultraviolet region was observed, leading to a decrease in transparency in the visible range. The drift velocity increased linearly with applied voltage and decreased with increasing distance between contacts. For samples with high mobility, the drift velocity reached values of $13.25 \cdot 10^{-4}$ m/s at $U=5$ mV and $d=5$ mm. *Conclusions.* The Drude theory

was successfully applied to analyze the electronic and optical properties of SnO₂:Sb thin films. It was established that the conductivity and transparency of the material can be optimized by varying the antimony doping level. It was shown that the drift velocity of charge carriers depends on mobility, voltage, and sample geometry. This opens up opportunities for designing devices with improved characteristics. The obtained results demonstrate the potential of using SnO₂:Sb in optoelectronic devices where a combination of high transparency and conductivity is required.

Keywords: transparent conducting oxides, spray pyrolysis, Drude theory, free electron theory, charge transport, charge carrier concentration, charge carrier mobility, plasma frequency

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” (No. 124041700069-0).

For citation: Zinchenko T.O., Pecherskaya E.A., Krevchik V.D., Kononov S.V., Artamonov D.V., Gurin S.A., Novichkov M.D., Makievski A. Investigation of the electronic and optical properties of thin-film coatings based on SnO₂:Sb. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2025;(1):81–92. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2025-1-7

Введение

Теория Друде позволяет формализовать движение электронов в металлах и проводящих материалах, базируясь на представлении об электронах как о свободных частицах, движущихся в среде с определенным сопротивлением. Основные положения теории описывают электроны как классические частицы, совершающие столкновения с ионами кристаллической решетки, при этом между столкновениями электроны движутся свободно [1, 2]. Столкновения происходят случайно, среднее время между столкновениями называется временем релаксации. Внешнее электрическое поле ускоряет электроны, но столкновения ограничивают их скорость, что приводит к возникновению сопротивления.

Объектом исследования являются прозрачные проводящие оксиды (ППО) на основе диоксида олова, легированного сурьмой, которые получены методом спрей-пиролиза [3, 4]. Прозрачные проводящие оксиды – полупроводниковые материалы, обладающие высокими показателями прозрачности и проводимости [5–7]. Теория Друде применена к полученным образцам с целью анализа данных по электрофизическим (время релаксации, дрейфовая скорость) и оптическим свойствам (плазменная частота) для улучшения в дальнейшем технологии их изготовления.

Материалы и методы

Для корректного применения теоретической модели Друде при исследовании проводящих прозрачных оксидов требуется косвенным образом определить ряд наиболее значимых электрофизических параметров, к которым относятся следующие: плотность носителей заряда, их подвижность и электрическая проводимость образцов. В рамках данного исследования для измерения электрического сопротивления использован метод Ван дер Пау, обладающий рядом преимуществ [8].

Особенность примененного метода заключается в возможности работы с плоскопараллельными образцами различной геометрической конфигура-

ции, что выгодно отличает его от традиционных холловских измерений, требующих строго прямоугольной формы испытуемых образцов. Теоретически оптимальная геометрия для измерений по методу Ван дер Пау представляет собой структуру в виде четырехлепесткового клевера с характерными разделительными просветами между контактными зонами. Однако практическая реализация такой конфигурации сопряжена со значительными технологическими трудностями.

В исследовательской практике предпочтение отдается однородным по толщине образцам упрощенной геометрии, преимущественно квадратной или круглой формы. На таких образцах размещается минимально необходимое количество омических контактов, как правило четыре точечных электрода, расположенных равномерно по периметру исследуемой пластины. При работе с квадратными образцами контактные площадки логично располагать в угловых точках квадрата.

Ключевая методологическая особенность процедуры измерений заключается в специфическом алгоритме определения удельного электрического сопротивления. В условиях приложенного магнитного поля электрический ток пропускается через пару соседних контактов, в то время как разность электрических потенциалов U_{BC} регистрируется между двумя оставшимися электродами (рис. 1,а).

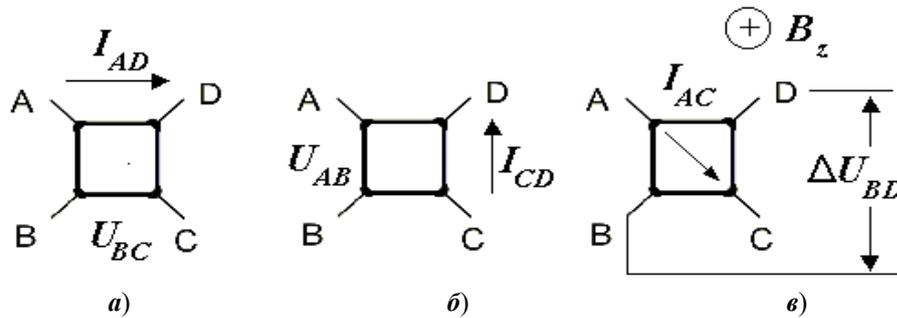


Рис. 1. Образец Ван дер Пау квадратной формы:
 а – измерение $R_{AD,BC}$; б – измерение $R_{CD,AB}$; в – измерение $\Delta R_{AC,BD}$

В результате определяется сопротивление $R_{AD,BC} = U_{BC}/I_{AD}$ (индексы соответствуют номерам контактов). Затем процедура повторяется, но для других пар контактов (рис. 1,б), и определяется сопротивление $R_{CD,AB} = U_{AB}/I_{CD}$.

Вычисление удельного сопротивления ρ (в Ом·см) выполняется по формуле

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2 \cdot I} U = \frac{4,52d}{I} U, \quad (1)$$

где d – толщина слоя прозрачного проводящего покрытия.

Подвижность электронов измерена с помощью эффекта Холла.

Коэффициент Холла (см³/Кл) находится из следующего выражения:

$$R_H = \frac{U_{AC}(B) - U_{AC}(-B) + U_{BD}(B) - U_{BD}(-B)}{4IB} d, \quad (2)$$

где $U_{AC}(B)$, $U_{AC}(-B)$ – значения напряжения между контактами A и C при включенном положительном и отрицательном направлениях магнитного поля (рис. 1,б); B – индукция магнитного поля.

Способ определения R_H в основном не отличается от классического, единственным отличием является то, что в процессе измерений нужно изменять направление магнитного поля.

Холловская подвижность рассчитывается на основе полученных значений ρ и R_H :

$$\mu = \frac{R_H}{\rho}. \quad (3)$$

Широкое распространение метода Ван дер Пау в исследовательской практике обусловлено его относительной простотой и возможностью выполнения измерений на образцах произвольной формы при необходимости контроля только одного геометрического параметра – толщины образца d .

Также рассчитывается концентрация носителей заряда n :

$$n = \frac{n_s}{d}. \quad (4)$$

Для расчета объемной концентрации зарядов n_s применяется следующая формула:

$$n_s = \frac{IB}{eV_H}, \quad (5)$$

где V_H – напряжение Холла; e – заряд электрона.

Результаты

В табл. 1 представлены результаты измерения сопротивления, толщины покрытия, концентрации и подвижности носителей заряда для 10 образцов прозрачных проводящих оксидов.

Таблица 1
Результаты измерений параметров, полученные методом Ван дер Пау

Образец	$R(\rho/d)$, Ом/□	d , нм	n , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)
1	675	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{19}$	8,03
2	637	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$8,11 \cdot 10^{19}$	9,15
3	426	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$3,56 \cdot 10^{20}$	9,12
4	139	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$9,04 \cdot 10^{20}$	8,41
5	89	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$7,79 \cdot 10^{20}$	6,02
6	221	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{21}$	7,38
7	95	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{20}$	6,31
8	57	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$8,98 \cdot 10^{20}$	6,34
9	28	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{21}$	4,83
10	262	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$2,15 \cdot 10^{21}$	5,64

Согласно классической теории Друде время релаксации электронов определяется по формуле

$$\tau = \frac{\sigma m}{ne^2}, \quad (6)$$

где проводимость σ рассчитывается по известному сопротивлению ($\sigma = 1 / R$).

Результаты расчета проводимости и времени релаксации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета значений проводимости и времени релаксации электронов

Образец	σ , См/□	τ , с
1	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-11}$
2	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-11}$
3	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-11}$
4	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-11}$
5	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$
6	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$
7	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$
8	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$
9	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$8,26 \cdot 10^{-12}$
10	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$9,65 \cdot 10^{-12}$

Для анализа полученных результатов построены зависимости времени релаксации от проводимости покрытия (рис. 2,а) и подвижности носителей заряда (рис. 2,б).

Время релаксации прямо пропорционально подвижности, что следует из формулы (6). Выводы о том, что с увеличением подвижности возрастает время релаксации, хорошо согласуются с результатами, представленными в работах [9, 10]. Время релаксации не зависит напрямую от концентрации электронов, но косвенно связано через подвижность. Высокая концентрация электронов может приводить к увеличению числа столкновений, что способно снижать подвижность и, соответственно, время релаксации. Проводимость зависит как от концентрации электронов, так и от времени релаксации. Таким образом, чем больше подвижность носителей заряда, тем выше проводимость при прочих равных условиях.

Теория Друде также применена для описания оптических свойств проводящих материалов [11, 12]. С ее помощью рассчитана плазменная частота ω_p :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}}, \quad (7)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; m^* – эффективная масса электрона.

Плазменная частота определяет, при каких длинах волн материал становится прозрачным.

Чтобы выразить плазменную частоту в герцах, использована формула:

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}, \quad (8)$$

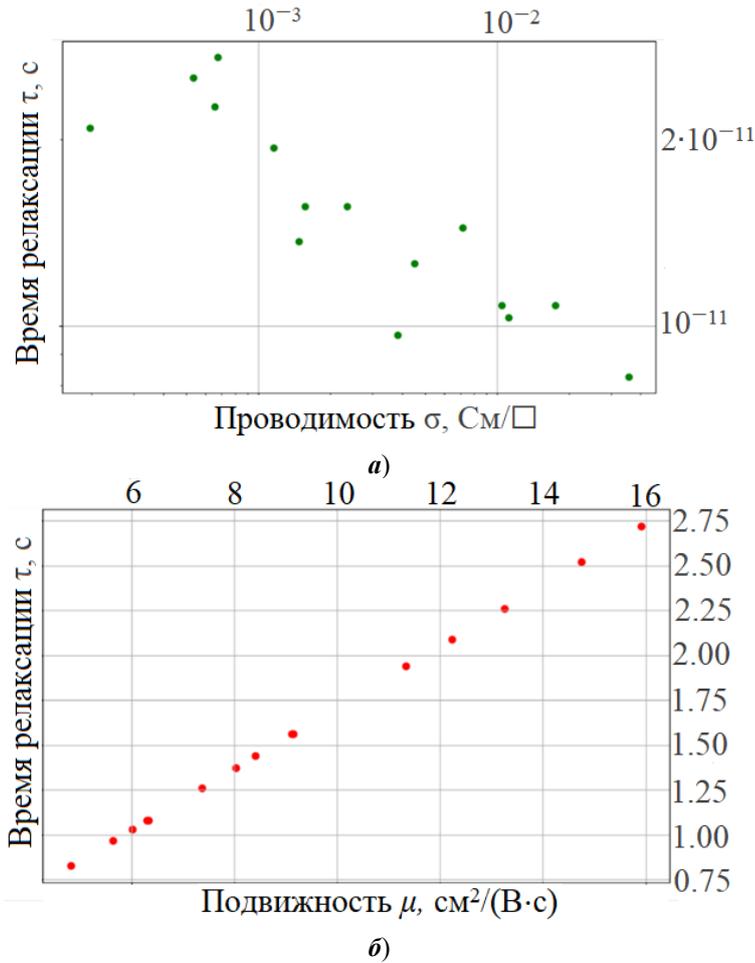


Рис. 2. Графики зависимостей времени релаксации от параметров покрытия: *a* – от проводимости покрытия; *b* – от подвижности носителей заряда

Для определения того, какая плазменная частота соответствует какой длине волны, использована известная формула:

$$\lambda_p = \frac{c}{f_p}, \quad (9)$$

где c – скорость света.

Полученные результаты расчета плазменной частоты представлены в табл. 3.

Для низких концентраций носителей заряда плазменная частота соответствует инфракрасной области спектра. Материал будет прозрачным для видимого света. Для средних концентраций плазменная частота соответствует ближней инфракрасной и красной части видимого спектра. Материал будет прозрачным для видимого света, но начнет поглощать в ближнем инфракрасном диапазоне. Для высоких концентраций плазменная частота соответствует фиолетовой и ультрафиолетовой областям спектра. Материал будет поглощать видимый свет и станет непрозрачным.

Таблица 3

Результаты расчета плазменной частоты

Образец	$n, \text{см}^{-3}$	$\omega_p, \text{рад/с}$	$f_p, \text{Гц}$	$\lambda_p, \text{нм}$
1	$5,31 \cdot 10^{19}$	$7,51 \cdot 10^{14}$	$1,19 \cdot 10^{14}$	2520
2	$8,11 \cdot 10^{19}$	$9,28 \cdot 10^{14}$	$1,48 \cdot 10^{14}$	2030
3	$3,56 \cdot 10^{20}$	$1,95 \cdot 10^{15}$	$3,10 \cdot 10^{14}$	968
4	$9,04 \cdot 10^{20}$	$3,10 \cdot 10^{15}$	$4,93 \cdot 10^{14}$	609
5	$7,79 \cdot 10^{20}$	$2,88 \cdot 10^{15}$	$4,58 \cdot 10^{14}$	655
6	$2,33 \cdot 10^{21}$	$4,99 \cdot 10^{15}$	$7,94 \cdot 10^{14}$	378
7	$3,7 \cdot 10^{20}$	$1,98 \cdot 10^{15}$	$3,15 \cdot 10^{14}$	952
8	$8,98 \cdot 10^{20}$	$3,08 \cdot 10^{15}$	$4,90 \cdot 10^{14}$	612
9	$1,73 \cdot 10^{21}$	$4,28 \cdot 10^{15}$	$6,81 \cdot 10^{14}$	441
10	$2,15 \cdot 10^{21}$	$4,77 \cdot 10^{15}$	$7,59 \cdot 10^{14}$	395

Также во время исследований методом Ван дер Пау на зонды подавалось напряжение, благодаря этому была рассчитана дрейфовая скорость по формуле

$$v_d = \mu E, \quad (10)$$

где μ – подвижность электронов; E – напряженность электрического поля, при этом $E = \frac{U}{d}$, где U – поданное напряжение, d – расстояние между зондами.

Результаты расчета дрейфовой скорости представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета дрейфовой скорости

Образец	$\mu, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$v_d, \text{м/с}, \text{при } E = 0,2 \text{ В/м}$	$v_d, \text{м/с}, \text{при } E = 0,1 \text{ В/м}$
1	8,03	$1,606 \cdot 10^{-4}$	$0,803 \cdot 10^{-4}$
2	9,15	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$0,915 \cdot 10^{-4}$
3	9,12	$1,824 \cdot 10^{-4}$	$0,912 \cdot 10^{-4}$
4	8,41	$1,682 \cdot 10^{-4}$	$0,841 \cdot 10^{-4}$
5	6,02	$1,204 \cdot 10^{-4}$	$0,602 \cdot 10^{-4}$
6	7,38	$1,476 \cdot 10^{-4}$	$0,738 \cdot 10^{-4}$
7	6,31	$1,262 \cdot 10^{-4}$	$0,631 \cdot 10^{-4}$
8	6,34	$1,268 \cdot 10^{-4}$	$0,634 \cdot 10^{-4}$
9	4,83	$0,966 \cdot 10^{-4}$	$0,483 \cdot 10^{-4}$
10	5,64	$1,128 \cdot 10^{-4}$	$0,564 \cdot 10^{-4}$

Подвижность является ключевым параметром, определяющим дрейфовую скорость. В материалах с высокой подвижностью ($\text{SnO}_2:\text{Sb}$) электроны движутся быстрее, что приводит к высокой проводимости.

Увеличение напряженности поля (например путем увеличения напряжения или уменьшения расстояния d) приводит к увеличению дрейфовой скорости. Для оптимизации свойств прозрачных проводящих оксидов (например $\text{SnO}_2:\text{Sb}$) необходимо увеличивать подвижность и концентрацию носителей, а также напряженность поля.

Заключение

Теория Друде успешно применена для анализа электрофизических и оптических свойств тонкопленочных покрытий $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, полученных методом спрей-пиролиза. Данный теоретический подход позволил установить количественные взаимосвязи между микроскопическими параметрами материала и его макроскопическими свойствами.

Установлены ключевые закономерности для электрических свойств. Проводимость пленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ варьируется в широком диапазоне в зависимости от концентрации носителей. Подвижность носителей заряда находится в диапазоне от 4,83 до 9,15 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что является хорошим показателем для прозрачных проводящих оксидов. Время релаксации электронов находится в пределах от $8,26 \cdot 10^{-12}$ до $1,56 \cdot 10^{-11}$ с и прямо пропорционально подвижности носителей.

Выявлены важные зависимости оптических характеристик. Плазменная частота материалов находится в диапазоне от $7,51 \cdot 10^{14}$ до $4,99 \cdot 10^{15}$ рад/с. Длина волны плазменного резонанса варьируется от 378 до 2520 нм, что позволяет регулировать оптические свойства материала. Прозрачность покрытий в видимом диапазоне напрямую связана с концентрацией носителей заряда: низкие концентрации обеспечивают высокую прозрачность (>80 %), а высокие концентрации приводят к поглощению в видимой области.

Дрейфовая скорость носителей заряда линейно зависит от напряженности электрического поля. Максимальная дрейфовая скорость достигает $1,83 \cdot 10^{-4}$ м/с при напряженности поля 0,2 В/м. Существует обратная зависимость между концентрацией носителей и их подвижностью, что объясняется увеличением рассеяния при высокой концентрации.

Список литературы

1. Drude P. Zur Elektronentheorie der Metalle // *Annalen der Physik*. 1900. Vol. 306, № 3. P. 566-613. doi: 10.1002/andp.19003060312
2. Ashcroft N. W., Mermin N. D. *Solid State Physics*. Philadelphia : Saunders College, 1976. 848 p.
3. Pecherskayaa E. A., Zinchenko T. O., Golubkova P. E., Karpanina O. V., Gurina S. A., Novichkov M. D. Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 58, № 3. P. 798–806.
4. Pecherskaya E. A., Semenov A. D., Zinchenko T. O., Gurin S. A., Kononov S. V., Novichkov M. D., Shepeleva A. E., Tuzova D. E. Calculation of the spray supply system characteristics for obtaining film material by spray-pyrolysis // *Vacuum*. 2025. Vol. 234. P. 114100. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114100
5. Gordon R. G. Criteria for Choosing Transparent Conductors // *MRS Bulletin*. 2000. Vol. 25, № 8. P. 52–57. doi: 10.1557/mrs2000.151
6. Ginley D. S., Bright C. Transparent Conducting Oxides // *MRS Bulletin*. 2000. Vol. 25, № 8. P. 15–18. doi: 10.1557/mrs2000.256
7. Chopra K. L., Major S., Pandya D. K. Transparent conductors – A status review // *Thin Solid Films*. 1983. Vol. 102, № 1. P. 1–46. doi: 10.1016/0040-6090(83)90256-0
8. Van der Pauw L. J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape // *Philips Research Reports*. 1958. Vol. 13. P. 1–9.
9. Mishra R. L., Sharma S., Suresh R. Antimony doped tin oxide thin films: Electrical and optical properties // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019. Vol. 93. P. 33–43. doi: 10.1016/j.mssp.2019.01.005

10. 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
11. Das S., Jayaraman V. SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 66. P. 112–255. doi: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.003
12. Ginley D. S., Hosono H., Paine D. C. *Handbook of Transparent Conductors*. New York : Springer, 2010. 533 p. doi: 10.1007/978-1-4419-1638-9

References

1. Drude P. Zur Elektronentheorie der Metalle. *Annalen der Physik*. 1900;306(3):566–613. doi: 10.1002/andp.19003060312
2. Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid State Physics*. Philadelphia: Saunders College, 1976:848.
3. Pecherskayaa E.A., Zinchenko T.O., Golubkova P.E., Karpanina O.V., Gurina S.A., Novichkov M.D. Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Properties of Transparent Conductive Oxides. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(3):798–806.
4. Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Zinchenko T.O., Gurin S.A., Konovalov S.V., Novichkov M.D., Shepeleva A.E., Tuzova D.E. Calculation of the spray supply system characteristics for obtaining film material by spray-pyrolysis. *Vacuum*. 2025;234:114100. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114100
5. Gordon R.G. Criteria for Choosing Transparent Conductors. *MRS Bulletin*. 2000;25(8):52–57. doi: 10.1557/mrs2000.151
6. Ginley D.S., Bright C. Transparent Conducting Oxides. *MRS Bulletin*. 2000;25(8):15–18. doi: 10.1557/mrs2000.256
7. Chopra K.L., Major S., Pandya D.K. Transparent conductors – A status review. *Thin Solid Films*. 1983;102(1):1–46. doi: 10.1016/0040-6090(83)90256-0
8. Van der Pauw L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips Research Reports*. 1958;13:1–9.
9. Mishra R.L., Sharma S., Suresh R. Antimony doped tin oxide thin films: Electrical and optical properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019;93:33–43. doi: 10.1016/j.mssp.2019.01.005
10. 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
11. Das S., Jayaraman V. SnO₂: A comprehensive review on structures and gas sensors. *Progress in Materials Science*. 2014;66:112–255. doi: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.003
12. Ginley D.S., Hosono H., Paine D.C. *Handbook of Transparent Conductors*. New York: Springer, 2010:533. doi: 10.1007/978-1-4419-1638-9

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 engineering sciences, senior lecturer of the sub-department of information and measuring technology 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

Владимир Дмитриевич Кревчик

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, декан факультета
информационных технологий
и электроники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

Сергей Валерьевич Коновалов

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной
деятельности, Сибирский
государственный индустриальный
университет (Россия, Кемеровская
область – Кузбасс, г. Новокузнецк,
ул. Кирова, 42); ведущий научный
сотрудник научно-производственной
лаборатории «Полет» кафедры
информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автономных
информационных и управляющих
систем, первый проректор университета,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dva@pnzgu.ru

Сергей Александрович Гурин

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник научно-
производственной лаборатории «Полет»
кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: teslananoel@rambler.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

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

Vladimir D. Krevchik

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the
sub-department of physics, dean of the
faculty of information technology
and electronics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey V. Kononov

Doctor of engineering sciences, professor,
vice rector for research and innovation,
Siberian State Industrial University
(42 Kirova street, Novokuznetsk,
Kemero region – Kuzbass, Russia);
leading researcher at SPL “Polet”
of the sub-department of information
and measuring technology and metrology,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Dmitry V. Artamonov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of autonomous information and control
systems, first vice-rector,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Sergey A. Gurin

Candidate of engineering sciences,
senior researcher at SPL “Polet”
of the sub-department of information
and measuring technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Максим Дмитриевич Новичков

аспирант, младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Полет» кафедры информационно-измерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: novichkov1998maks@gmail.com

Maksim D. Novichkov

Postgraduate student, junior research assistant at SPL “Polet” of the sub-department of information and measuring technology and metrology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Макиевский

кандидат наук, научный директор, SINTERFACE Technologies (Германия, г. Берлин, ул. Mueggelseedamm, 70)

E-mail: a.makievski@sinterface.com

Alexander Makievski

Candidate of sciences, scientific director of company, SINTERFACE Technologies (70 Mueggelseedamm, 12587 Berlin, Germany)

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

Поступила в редакцию / Received 02.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.04.2025

Принята к публикации / Accepted 10.05.2025