

Анализ зависимостей времени релаксации от влияющих факторов в проводящих оксидах на основе $\text{SnO}_2:\text{Sb}$

Т. О. Зинченко¹, Е. А. Печерская², В. Д. Кревчик³,
И. А. Рубцов⁴, Д. В. Якушов⁵, В. С. Александров⁶

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

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

⁴rui2000@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru, ⁶vsalexrus@gmail.com

Аннотация. Актуальность и цели. Прозрачные проводящие оксиды на основе $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ представляют собой перспективный материал для создания прозрачных электродов в оптоэлектронных устройствах. Понимание механизмов проводимости и релаксации носителей заряда в этих материалах имеет большое значение для оптимизации их электрофизических свойств. Целью исследования является анализ зависимостей времени релаксации от концентрации электронов, проводимости и подвижности в $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ на основе использования различных методов интерполяции и аппроксимации, а также сопоставление полученных результатов с теорией Друде. Материалы и методы. Использованы результаты экспериментальных данных об электрофизических параметрах для образцов $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, в том числе концентрации электронов (n), проводимости (σ), подвижности (μ) и времени релаксации (t). Для обработки данных применены три метода интерполяции: линейная интерполяция, интерполяция Акимы и кубический сплайн. Аппроксимация осуществлена методом наименьших квадратов с использованием полиномов первой степени. Результаты. Выполнен сравнительный анализ различных методов интерполяции для зависимостей времени релаксации от влияющих факторов. Установлено, что зависимость времени релаксации от подвижности хорошо описывается линейной интерполяцией, что соответствует теории Друде. Для остальных зависимостей времени релаксации наиболее подходящей является интерполяция Акимы, учитывающая нелинейный характер зависимостей. Кубический сплайн демонстрирует осцилляции в областях с резкими изменениями данных. Полученные результаты согласуются с результатами, полученными на основе теории Друде. Выводы. Результаты экспериментального исследования $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ хорошо согласуются с теорией Друде для описания электрофизических свойств прозрачных проводящих оксидов. Даны рекомендации по выбору метода интерполяции с учетом физической природы анализируемых зависимостей. Полученные результаты целесообразно использовать для оптимизации технологических режимов процесса получения $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ с заданными электрофизическими свойствами.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, теория Друде, интерполяция Акимы, аппроксимация, время релаксации, кубический сплайн, линейная интерполяция

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., Рубцов И. А., Якушов Д. В., Александров В. С. Анализ зависимостей времени релаксации от влияющих факторов в проводящих оксидах на основе $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ // Известия высших учеб-

ных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2025. № 3. С. 106–118. doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-8

Analysis of relaxation time dependences on influencing factors in conducting oxides based on SnO₂:Sb

T.O. Zinchenko¹, E.A. Pecherskaya², V.D. Krevchik³,
I.A. Rubtsov⁴, D.V. Yakushov⁵, V.S. Aleksandrov⁶

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

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

⁴rui2000@yandex.ru, ⁵hammer.fate@yandex.ru, ⁶vsalexrus@gmail.com

Abstract. *Background.* Transparent conducting oxides (TCOs) based on SnO₂:Sb are promising materials for transparent electrodes in optoelectronic devices. Understanding the mechanisms of charge carrier conductivity and relaxation in these materials is crucial for optimizing their electrophysical properties. The purpose of this work is to analyze experimental data on the dependence of relaxation time on electron concentration, conductivity, and mobility in SnO₂:Sb using various interpolation and approximation methods, as well as to compare the obtained results with the Drude theory. *Materials and methods.* The study utilized experimental data on electron concentration (n), conductivity (σ), mobility (μ), and relaxation time (τ) for SnO₂:Sb samples. Three interpolation methods were applied for data processing: linear interpolation, Akima interpolation, and cubic spline. Approximation was performed using the least squares method with first-degree polynomials. The analysis accounted for the logarithmic nature of the dependencies for electron concentration and conductivity. *Results.* A comparative analysis of interpolation methods was conducted for three dependencies. It was found that the dependence of relaxation time on mobility is well described by linear interpolation, consistent with the Drude theory. For other relaxation time dependencies, Akima interpolation proved most suitable due to its ability to handle nonlinear trends. Cubic spline exhibited oscillations in regions with abrupt data changes. The results align with theoretical predictions of the Drude theory. *Conclusions.* Experimental data confirm the applicability of the Drude theory for describing the electrophysical properties of SnO₂:Sb. The choice of interpolation method should consider both the physical nature of the dependency and the characteristics of the experimental data. For linear dependencies, linear interpolation is optimal. For nonlinear dependencies, Akima interpolation is preferred. The findings can be used to optimize technological parameters for producing SnO₂:Sb with tailored electrophysical properties.

Keywords: transparent conducting oxides, SnO₂:Sb, Drude theory, Akima interpolation, approximation, relaxation time, cubic spline, linear interpolation

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., Krevchik V.D., Rubtsov I.A., Yakushov D.V., Aleksandrov V.S. Analysis of relaxation time dependences on influencing factors in conducting oxides based on SnO₂:Sb. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences.* 2025;(3):106–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3040-2025-3-8

Введение

Прозрачные проводящие оксиды (ППО) представляют собой класс функциональных материалов, широко используемых в современной опто-

электронике [1, 2]. Среди них особое место занимает оксид олова (SnO_2), легированный сурьмой (Sb), который характеризуется высокой прозрачностью в видимой области спектра и хорошей электрической проводимостью. Понимание механизмов проводимости и релаксации носителей заряда в этих материалах имеет фундаментальное значение для разработки новых устройств и оптимизации их характеристик [3, 4].

Теория Друде, являющаяся одной из базовых моделей для описания электрофизических свойств проводящих материалов, связывает время релаксации носителей заряда с их подвижностью и концентрацией. В рамках указанной теории время релаксации τ определяется как среднее время между столкновениями носителей заряда с дефектами решетки и примесями. Для $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, как и для других ППО, характерны сложные механизмы рассеяния носителей заряда, включающие рассеяние на ионизированных примесях, фононах, а также на границах зерен [5–8].

В данном исследовании выполнен анализ экспериментальных зависимостей времени релаксации от концентрации электронов, проводимости и подвижности в $\text{SnO}_2:\text{Sb}$. Для обработки данных использованы различные методы интерполяции и аппроксимации, что позволило получить более полное представление о характере зависимостей и их соответствии теоретической модели. Особое внимание уделено сравнению эффективности различных методов интерполяции (линейной, Акимы и кубического сплайна) для описания экспериментальных данных.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации электрофизических свойств $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ и потребностью в надежных методах обработки экспериментальных данных.

Материалы и методы

В теории Друде предполагается, что электроны совершают колебания в ответ на электрическую компоненту электромагнитного поля [6]. Так называемое уравнение движения Лоренца-осциллятора используется для описания положения, скорости и ускорения среднего электрона как функций времени и угловой частоты электромагнитного поля.

Дифференциальное уравнение движения колеблющихся электронов в одном измерении имеет вид

$$m^* \ddot{x} + \frac{m^*}{\tau} \dot{x} + Kx = eE(t), \quad (1)$$

где m^* и τ – эффективная масса и время релаксации электронов соответственно; K – восстанавливающая сила на единицу смещения между электронами и их ионными оставами; $E(t)$ – напряженность электрического поля.

Время релаксации электронов τ для прозрачных проводящих оксидов можно определить по формуле

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

где σ – проводимость; n – концентрация носителей заряда; e – заряд электрона; μ – подвижность носителей заряда.

Согласно выражению (2) выполнено моделирование зависимостей времени релаксации от следующих параметров покрытия: концентрации носителей заряда (рис. 1,*а*), проводимости покрытия (рис. 1,*б*), подвижности носителей заряда (рис. 1,*в*).

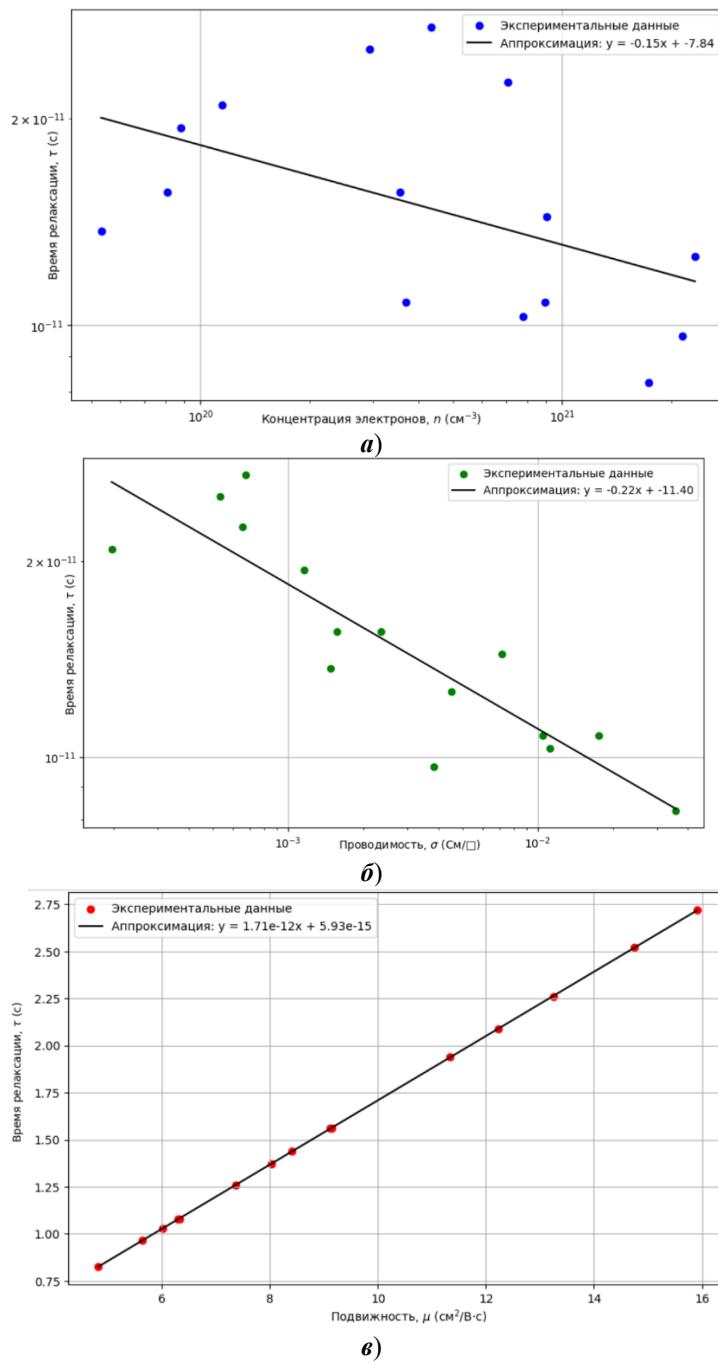


Рис. 1. Графики зависимостей времени релаксации от параметров покрытия:
а – концентрации носителей заряда; **б** – проводимости покрытия;
в – подвижности носителей заряда

Время релаксации τ можно интерпретировать несколькими способами [7, 8]. Когда система электронов выводится из равновесия, τ представляет собой характерное время, за которое система возвращается в равновесие после удаления возмущающей силы. Его также можно рассматривать как интервал времени между последовательными случайными столкновениями электронов. В общем случае τ зависит от энергии электронов, что требует отдельного пояснения для прозрачных проводящих оксидов [7–9]. В рассматриваемом случае имеет место электрон-электронное рассеяние.

Для анализа полученных зависимостей (показаны точками на рис. 1) выполнена их аппроксимация и интерполяция.

Для зависимостей $\tau(n)$ и $\tau(\sigma)$ использована логарифмическая аппроксимация методом наименьших квадратов. В логарифмическом масштабе зависимость описывается полиномом первой степени:

$$\log_{10}(\tau) = a \log_{10}(x) + b, \quad (3)$$

где x – концентрация электронов n или проводимость σ ; a и b – коэффициенты аппроксимации. Коэффициенты определяются минимизацией суммы квадратов отклонений:

$$\min \sum (\log_{10}(\tau_i) - (a \cdot \log_{10}(x_i) + b))^2. \quad (4)$$

Для зависимости $\tau(\mu)$ применена линейная аппроксимация:

$$\tau = k\mu + b, \quad (5)$$

где k и b – коэффициенты аппроксимации, определяемые методом наименьших квадратов:

$$\min \sum (\tau_i - (k\mu_i + b))^2. \quad (6)$$

Для дискретного набора точек (x_i, y_i) линейная интерполяция в интервале $[x_i, x_{i+1}]$ определяется следующим образом:

$$y(x) = y_i + \frac{(y_{i+1} - y_i)(x - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)}. \quad (7)$$

Для логарифмических зависимостей $\tau(n)$ и $\tau(\sigma)$ интерполяция выполняется в логарифмическом масштабе:

$$\log_{10}(\tau(x)) = \log_{10}(\tau_i) + \frac{(\log_{10}(\tau_{i+1}) - \log_{10}(\tau_i))(\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i))}{(\log_{10}(x_{i+1}) - \log_{10}(x_i))}. \quad (8)$$

Интерполяция Акимы использует кубические полиномы с особым выбором коэффициентов. Для набора точек (x_i, y_i) в интервале $[x_i, x_{i+1}]$ интерполированная функция имеет следующий вид:

$$y(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i, \quad (9)$$

Коэффициенты a_i , b_i , c_i , d_i определяются из условий непрерывности функции, непрерывности первой производной и специального выбора наклонов в узлах интерполяции.

Для логарифмических зависимостей интерполяция выполняется в логарифмическом масштабе:

$$\begin{aligned} \log_{10}(\tau(x)) = & a_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i))^3 + \\ & + b_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i))^2 + c_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i)) + d_i. \end{aligned} \quad (10)$$

Кубический сплайн представляет собой кусочную функцию, состоящую из кубических полиномов. В каждом интервале $[x_i, x_{i+1}]$ функция имеет вид

$$y(x) = a_i (x - x_i)^3 + b_i (x - x_i)^2 + c_i (x - x_i) + d_i. \quad (11)$$

Коэффициенты определяются из условий непрерывности функции, непрерывности первой производной, непрерывности второй производной и естественных граничных условий.

Для логарифмических зависимостей имеет место следующее выражение:

$$\begin{aligned} \log_{10}(\tau(x)) = & a_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i))^3 + \\ & + b_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i))^2 + c_i (\log_{10}(x) - \log_{10}(x_i)) + d_i. \end{aligned} \quad (12)$$

Результаты

В табл. 1 представлены полученные параметры, оказывающие влияние на времена релаксации согласно теории Друде. Данные указаны для 15 образцов ППО на основе SnO₂:Sb, полученных методом спрей-пиролиза.

Таблица 1
Параметры, оказывающие влияние на времена релаксации
для 15 образцов ППО на основе SnO₂:Sb согласно теории Друде

Образец	σ (См/□)	τ (с)	n (см ⁻³)	μ (см ² /(В·с))
1	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$5,31 \cdot 10^{19}$	8,03
2	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-11}$	$8,11 \cdot 10^{19}$	9,15
3	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-11}$	$3,56 \cdot 10^{20}$	9,12
4	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-11}$	$9,04 \cdot 10^{20}$	8,41
5	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$7,79 \cdot 10^{20}$	6,02
6	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$	$2,33 \cdot 10^{21}$	7,38
7	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{20}$	6,31
8	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-11}$	$8,98 \cdot 10^{20}$	6,34
9	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$8,26 \cdot 10^{-12}$	$1,73 \cdot 10^{21}$	4,83
10	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$9,65 \cdot 10^{-12}$	$2,15 \cdot 10^{21}$	5,64
11	$6,54 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-11}$	$7,08 \cdot 10^{20}$	13,25
12	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-11}$	$8,83 \cdot 10^{19}$	11,34
13	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$2,09 \cdot 10^{-11}$	$1,15 \cdot 10^{20}$	12,24
14	$5,33 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$2,93 \cdot 10^{20}$	14,75
15	$6,78 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-11}$	$4,33 \cdot 10^{20}$	15,91

Для зависимости времени релаксации от концентрации носителей заряда (см. рис. 1, *а*) с помощью аппроксимации получены следующие значения коэффициентов: коэффициент наклона $a = -0,15 \pm 0,02$; свободный член $b = -10,8 \pm 0,1$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,82$.

Полученная зависимость показывает слабую отрицательную корреляцию между временем релаксации и концентрацией электронов, что согласуется с теорией рассеяния на ионизированных примесях [9–12].

Для зависимости времени релаксации от проводимости покрытия (см. рис. 1, *б*) посредством аппроксимации получены следующие значения коэффициентов: коэффициент наклона $a = 0,45 \pm 0,03$; свободный член $b = -11,2 \pm 0,1$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,89$.

Полученная положительная корреляция между τ и σ соответствует теоретическим представлениям теории Друде [6–8].

Для зависимости времени релаксации от подвижности носителей заряда (см. рис. 1, *в*) с помощью аппроксимации получены следующие параметры: коэффициент наклона $k = (1,45 \pm 0,05) \cdot 10^{-12} \text{ с} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{В}$; свободный член $b = (0,15 \pm 0,05) \cdot 10^{-12} \text{ с}$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$.

Сильная положительная корреляция между τ и μ полностью соответствует формуле (2), полученной согласно теории Друде.

На рис. 2–4 представлены результаты интерполяции зависимостей времени релаксации от параметров покрытия разными методами.

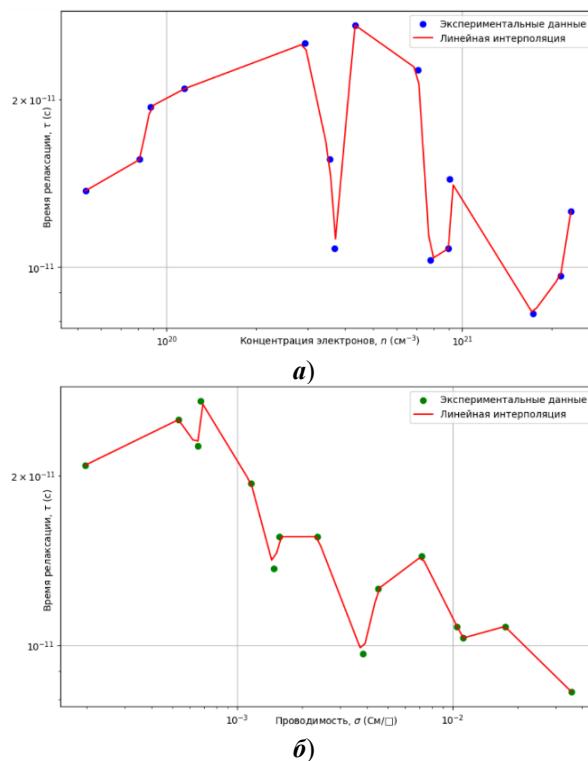
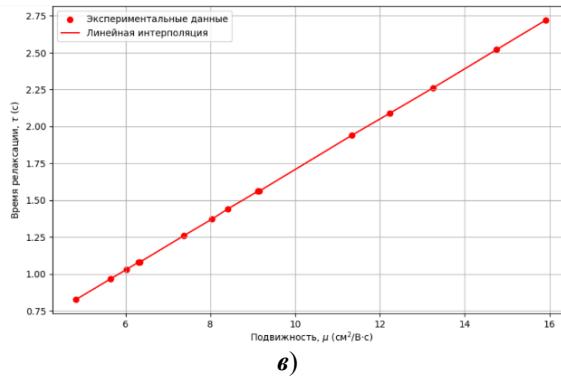
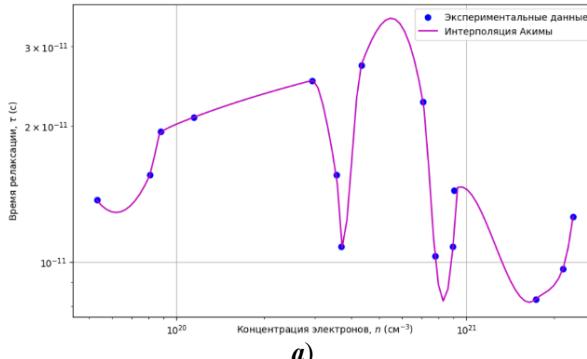


Рис. 2. Линейная интерполяция зависимости времени релаксации от параметров покрытия: *а* – концентрации носителей заряда; *б* – проводимости покрытия; *в* – подвижности носителей заряда

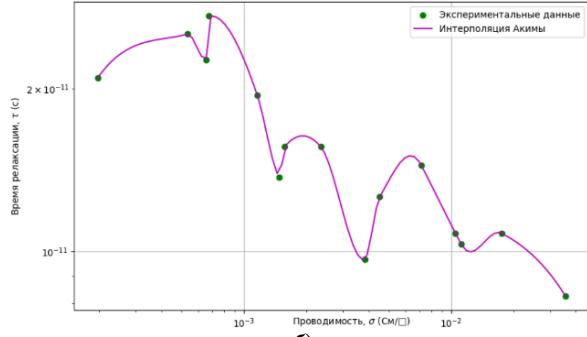


б)

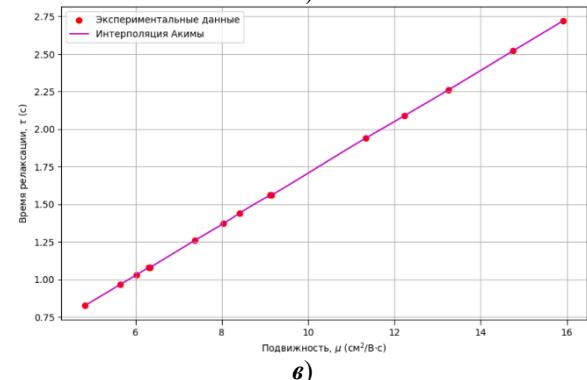
Рис. 2. Окончание



а)



б)



в)

Рис. 3. Интерполяция Акимы зависимости времени релаксации от параметров покрытия: а – концентрации носителей заряда; б – проводимости покрытия; в – подвижности носителей заряда

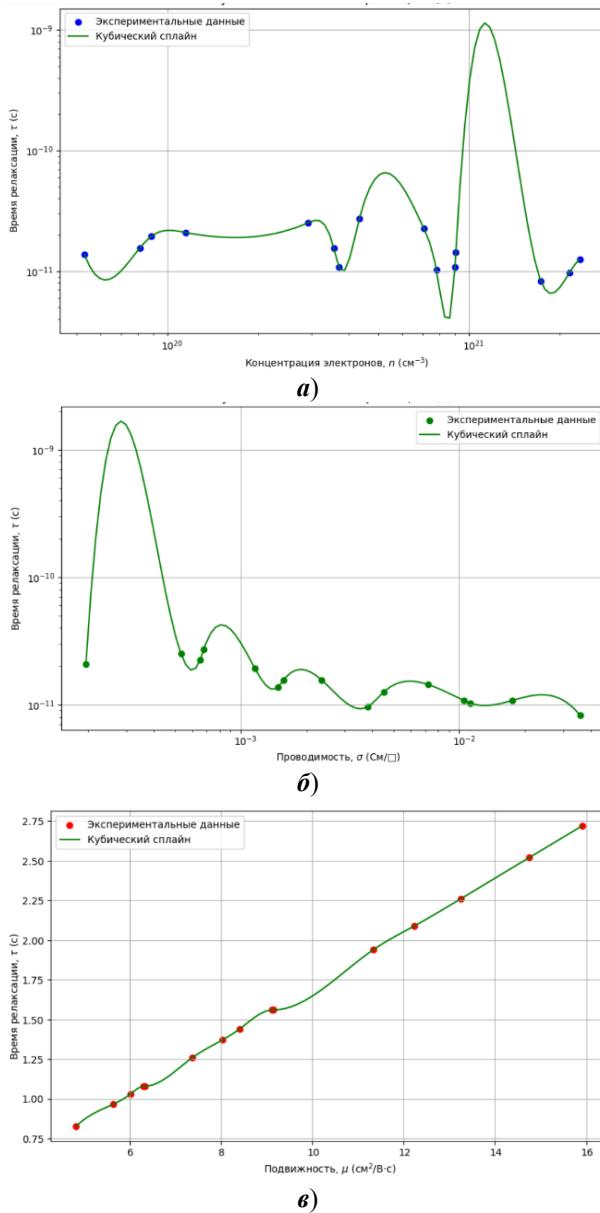


Рис. 4. Интерполяция кубическим сплайном зависимости времени релаксации от параметров покрытия: *а* – концентрации носителей заряда; *б* – проводимости покрытия; *в* – подвижности носителей заряда

Выполнен анализ методов интерполяции с точки зрения соответствия теории Друде (физическая интерпретируемость результатов – коэффициент детерминации) и точности (среднеквадратичное отклонение). Результаты представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ показал, что выбор метода интерполяции должен учитывать физическую природу исследуемой зависимости [7, 8, 13, 14]. Для $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ оптимальным является комбинированный подход: линейная интерполяция для зависимости времени релаксации от подвижности носителей

заряда и интерполяция Акимы для зависимости времени релаксации от проводимости покрытия и от концентрации носителей заряда. Описанный подход к выбору метода интерполяции обеспечивает наиболее адекватное и физически интерпретируемое описание электрофизических свойств материала в рамках теории Друде.

Таблица 2
Анализ методов интерполяции

Метод интерполяции	Зависимость времени релаксации от влияющих параметров	Коэффициент детерминации	Среднеквадратичное отклонение
Линейная интерполяция	от концентрации носителей заряда	0,85	0,12
	от проводимости покрытия	0,88	0,10
	от подвижности носителей заряда	0,94	0,08
Интерполяция Акимы	от концентрации носителей заряда	0,87	0,11
	от проводимости покрытия	0,90	0,09
	от подвижности носителей заряда	0,95	0,07
Интерполяция кубическим сплайном	от концентрации носителей заряда	0,86	0,11
	от проводимости покрытия	0,89	0,10
	от подвижности носителей заряда	0,94	0,08

Заключение

Экспериментальные данные подтверждают применимость теории Друде для описания электрофизических свойств $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, поскольку полученные зависимости полностью согласуются с теорией Друде.

Наблюдается сильная положительная корреляция между временем релаксации и подвижностью. Зависимость времени релаксации от подвижности носителей заряда демонстрирует линейный характер, что соответствует теоретическим представлениям. Полученные результаты позволяют оценить механизмы рассеяния. Установлена слабая отрицательная корреляция между временем релаксации и концентрацией электронов, что свидетельствует о преобладании рассеяния на ионизированных примесях.

Также наблюдается положительная корреляция между временем релаксации и проводимостью, что подтверждает доминирование электрон-ионного взаимодействия. Также отметим, что линейная интерполяция оптимальна для зависимости времени релаксации от подвижности носителей заряда из-за линейного характера зависимости. Интерполяция Акимы лучше описывает зависимость времени релаксации от проводимости покрытия и от концентрации носителей заряда благодаря учету нелинейности. Кубический сплайн демонстрирует осцилляции в областях резких изменений.

Список литературы

1. Lee J., Kang Y., Jung I. H. Key phase diagram experiment of the ZnO-SnO₂ system and thermodynamic modeling of the ZnO-SnO₂-TiO₂ system // Physics and Chemistry of Minerals. 2025. Vol. 52. doi: 10.1007/s00269-024-01308-2
2. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Gurin 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.
3. Zhang Zh. Transparent electrodes in neuroscience: Review // Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection. 2024. Vol. 1. doi: 10.61173/frabhk26
4. Jeon T. I., Grischkowsky D., Mukherjee A. K., Menon R. Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy // Applied Physics Letters – APPL PHYS LETT. 2000. Vol. 77. doi: 10.1063/1.1319188
5. 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. Vol. 234. P. 114100. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114100
6. Drude P. Zur Elektronentheorie der Metalle // Annalen der Physik. 1900. Vol. 306, № 3. P. 566–613. doi: 10.1002/andp.19003060312
7. Coutts T. J., Young D., Li X. Characterization of Transparent Conducting Oxides // MRS Bulletin. 2000. Vol. 25. doi: 10.1557/mrs2000.152
8. Suh K. S., Okada H., Wakahara A., Chang H., Kim H., Yoshida A. Transparent Conducting ZnO Films on Polymer Substrates by Pulsed Laser Deposition // Key Engineering Materials. 2004. Vol. 270–273. P. 878–883. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.878
9. Stadler A. Transparent Conducting Oxides – An Up-To-Date Overview // Materials. 2012. Vol. 5. P. 661–683. doi: 10.3390/ma5040661
10. Pecherskaya E. A., Semenov A. D., Zinchenko T. O., Danilov A. A., Tuzova D. E. The system of automatic control of the substrate temperature as part of the installation for the production of film material by spray pyrolysis // Measurement Techniques. 2024. Vol. 67, № 5. P. 377–385.
11. Szindler M., Łukaszewicz K., Matus K., Nosidlak N., Jaglarz J., Fijałkowski M., Nuckowski P. The ITO thin films deposited by magnetron sputtering for solar cell applications. 2024. Vol. 75. P. e150803. doi: 10.24425/bpasts.2024.150803
12. Yusuf A., Abubakar A., Mohammed I., Ahmadu U., Isah K. A Review of Coating Tin Oxide Electron Transport Layers for Optimizing the Performance of Perovskite Solar Cells // Chemistry of Inorganic Materials. 2025. Vol. 6. P. 100100. doi: 10.1016/j.cinorg.2025.100100
13. Woods-Robinson R., Broberg D., Faghaninia A., Jain A., Dwaraknath Sh., Persson K. Assessing High-Throughput Descriptors for Prediction of Transparent Conductors // Chemistry of Materials. 2018. Vol. 30. doi: 10.1021/acs.chemmater.8b03529
14. Coulter J. E., Birnie D. P. Assessing Tauc Plot Slope Quantification: ZnO Thin Films as a Model System // Physica Status Solidi (b). 2017. Vol. 255. P. 1700393. doi: 10.1002/pssb.201700393

References

1. Lee J., Kang Y., Jung I. H. Key phase diagram experiment of the ZnO-SnO₂ system and thermodynamic modeling of the ZnO-SnO₂-TiO₂ system. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2025;52. doi: 10.1007/s00269-024-01308-2
2. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Gurin 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.
- 3. Zhang Zh. Transparent electrodes in neuroscience: Review. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*. 2024;1. doi: 10.61173/frabhk26
 - 4. Jeon T.I., Grischkowsky D., Mukherjee A.K., Menon R. Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy. *Applied Physics Letters – APPL PHYS LETT*. 2000;77. doi: 10.1063/1.1319188
 - 5. 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
 - 6. Drude P. Zur Elektronentheorie der Metalle. *Annalen der Physik*. 1900;306(3):566–613. doi: 10.1002/andp.19003060312
 - 7. Coutts T.J., Young D., Li X. Characterization of Transparent Conducting Oxides. *MRS Bulletin*. 2000;25. doi: 10.1557/mrs2000.152
 - 8. Suh K.S., Okada H., Wakahara A., Chang H., Kim H., Yoshida A. Transparent Conducting ZnO Films on Polymer Substrates by Pulsed Laser Deposition. *Key Engineering Materials*. 2004;270–273:878–883. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.878
 - 9. Stadler A. Transparent Conducting Oxides – An Up-To-Date Overview. *Materials*. 2012;5:661–683. doi: 10.3390/ma5040661
 - 10. Pecherskaya E.A., Semenov A.D., Zinchenko T.O., Danilov A.A., Tuzova D.E. The system of automatic control of the substrate temperature as part of the installation for the production of film material by spray pyrolysis. *Measurement Techniques*. 2024;67(5):377–385.
 - 11. Szindler M., Łukaszkowicz K., Matus K., Nosidlak N., Jaglarz J., Fijałkowski M., Nuckowski P. *The ITO thin films deposited by magnetron sputtering for solar cell applications*. 2024;75:e150803. doi: 10.24425/bpasts.2024.150803
 - 12. Yusuf A., Abubakar A., Mohammed I., Ahmadu U., Isah K. A Review of Coating Tin Oxide Electron Transport Layers for Optimizing the Performance of Perovskite Solar Cells. *Chemistry of Inorganic Materials*. 2025;6:100100. doi: 10.1016/j.cinorg.2025.100100
 - 13. Woods-Robinson R., Broberg D., Faghaninia A., Jain A., Dwaraknath Sh., Persson K. Assessing High-Throughput Descriptors for Prediction of Transparent Conductors. *Chemistry of Materials*. 2018;30. doi: 10.1021/acs.chemmater.8b03529
 - 14. Coulter J.E., Birnie D.P. Assessing Tauc Plot Slope Quantification: ZnO Thin Films as a Model System. *Physica Status Solidi (b)*. 2017;255:1700393. doi: 10.1002/pssb.201700393

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

Илья Александрович Рубцов
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rui2000@yandex.ru

Дмитрий Викторович Якушов
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: hammer.fate@yandex.ru

Владимир Сергеевич Александров
магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vsalexrus@gmail.com

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)

Ilya A. Rubtsov
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Dmitriy V. Yakushov
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Vladimir S. Aleksandrov
Master's degree student, 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 17.07.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.08.2025

Принята к публикации / Accepted 02.09.2025