

УДК 53.083.4  
EDN: RGBEGA

PACS: 73.50.Lw

## Термо-ЭДС наноразмерных пленок $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

© А. С. Терехова\*, Л. А. Зеленский, С. В. Смирнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
г. Томск, 634050 Россия\* E-mail: [tas18102004@mail.ru](mailto:tas18102004@mail.ru)Статья поступила в редакцию 27.10.2025; после доработки 21.11.2025; принята к публикации 27.04.2026  
Шифр научной специальности: 1.3.11

**Приведены результаты исследований дифференциальной термо-ЭДС и коэффициента Зеебека наноразмерных пленок  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$  (ИТО), полученных методом магнетронного распыления компактной мишени. Показана зависимость коэффициента термо-ЭДС пленок от температуры, а также объяснена ее корреляция с температурной зависимостью электропроводности. Спроектировано автоматизированное устройство для измерения термо-ЭДС пленок и распределения её по их поверхности в диапазоне температур от 300 до 450 К. Полученные результаты позволяют спрогнозировать возможность дальнейшего применения пленок ИТО в электронике.**

**Ключевые слова:** пленки ИТО, термо-ЭДС, коэффициент Зеебека, уровень Ферми, концентрация носителей заряда.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-67-72

### Введение

Прозрачные проводящие пленки  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$  (ИТО) находят широкое применение в качестве основного материала для оптоэлектронных устройств, биосенсоров, датчиков электрохимического анализа, датчиков температуры. Поскольку тонкие пленки ИТО во всех вышеперечисленных применениях используются в виде различных комбинаций с металлическими и полупроводниковыми материалами в широком диапазоне температур, то возникает проблема учета возникающей на их контакте термо-ЭДС. Термо-ЭДС является важнейшей характеристикой металлов и полупроводников. Зная её значение, можно вычислить такие их электрофизические характеристики, как коэффициент Зеебека, положение уровня Ферми, концентрацию носителей заряда, плотность состояний в зоне проводимости [1, 2].

Поэтому целью данной работы является измерение собственного коэффициента термо-

ЭДС пленок ИТО, что позволит спрогнозировать возможность дальнейшего применения пленок в электронике.

Коэффициент Зеебека  $S_{AB}$  для двух контактирующих материалов определяется по формуле:

$$S_{AB} = \frac{dU}{dT} = \alpha_A - \alpha_B, \quad (1)$$

где  $\alpha_A$  и  $\alpha_B$  – коэффициенты термо-ЭДС материалов А и В, соответственно.

Как правило, коэффициенты термо-ЭДС принимаются относительно свинца или платины, т.к. считается, что у этих материалов не возникает разности потенциалов при градиенте температур, и являются известной величиной для многих металлов. Таким образом, измеряя коэффициент Зеебека контакта ИТО с металлом, коэффициент термо-ЭДС которого известен, можно вычислить собственный коэффициент термо-ЭДС пленки.

В пленках ИТО электропроводность осуществляется как по делокализованным состояниям вблизи уровня Ферми, обусловленными вырожденностью полупроводника, так и пересяками по локализованным состояниям, представляющим из себя кислородные вакансии.

В области низких температур (10–100 °С) пленки ИТО представляют собой вырожденный полупроводник с высокой долей аморфизации. В данном случае наиболее подходящей для определения термо-ЭДС является формула, предложенная Моттом:

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot k^2 \cdot T}{3} \cdot \left( \frac{d(\ln \sigma)}{dE} \right)_{E=E_f} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент термо-ЭДС,  $k = 1,38 \times 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $E_f$  – положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости,  $\sigma$  – электропроводность.

Из формулы (2) можно определить положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости:

$$E_c - E_f = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 \cdot T}{q} \cdot \frac{1}{\alpha}. \quad (3)$$

Далее по формуле Бурштейна-Мосса можно вычислить концентрацию электронов в зоне проводимости:

$$n = \frac{8 \cdot \pi \cdot (3 \cdot m_e^*)^{\frac{3}{2}}}{3 \cdot h^3} \cdot (E_f - E_c)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

где  $m_e^*$  – эффективная масса электрона,  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка.

Однако при более высоких температурах электропроводность в пленках ИТО начинает осуществляться по прыжковому механизму. При этом энергетические уровни кислородных вакансий вырождены, т. е. обладают примерно одинаковой энергией, что способствует образованию зоны, по которой осуществляется электропроводность. Тогда температурную

зависимость термо-ЭДС можно представить следующим выражением:

$$\alpha = \omega_1 \cdot \left( -\frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 \cdot T}{q} \cdot \frac{1}{E_f} \right) + \omega_2 \cdot \left( -\frac{k}{q} \cdot \left( \frac{\pi - 2}{\pi} \cdot \frac{\Delta E_a}{k \cdot T} + \frac{2 \cdot \pi}{3} \cdot k \cdot T \right) \cdot \frac{1}{E_f} \right), \quad (5)$$

где  $\omega_1$  – вклад вырождения энергетических уровней кислородных вакансий в значение термо-ЭДС,  $\omega_2$  – вклад прыжкового механизма электропроводности в значение термо-ЭДС, а  $\Delta E_a$  – энергия активации электропроводности, которая может быть найдена из ее температурной зависимости:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right). \quad (6)$$

Наиболее распространенным является метод измерения коэффициента Зеебека тонких пленок ИТО, путем создания тонкопленочной термопары с эталонным материалом, например ИТО-вольфрам [4–8].

### Экспериментальная установка

В данной работе в качестве измерительных электродов используется вольфрамовая проволока диаметром 1 мм. Движение измерительных электродов производится при помощи четырех шаговых моторов с винтовой передачей. Для увеличения точности позиционирования у драйверов управления используется функция микрошага с делением 1/16, точность позиционирования в этом случае равняется  $\pm 5$  мкм.

Измерения напряжения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок производятся по четырем точкам, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термо-ЭДС по поверхности образца. Также, на разработанном стенде есть возможность исследования зависимости напряжения термо-ЭДС от температуры. 3D-модель измерительной части установки представлена на рисунке 1.

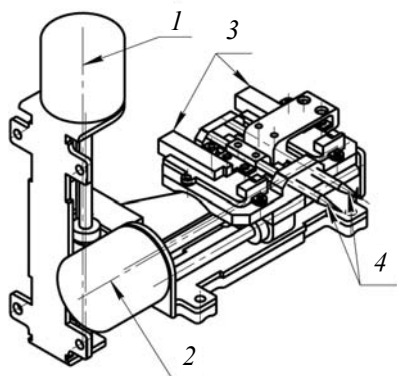


Рис. 1. 3D-модель измерительной части установки:  
1 – двигатель оси Y, 2 – двигатель оси X,  
3 – двигатели оси Z, 4 – медные электроды

Электрод измеряет термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок в трех точках, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термо-ЭДС по поверхности пленки.

На рисунке 2 представлен внешний вид установки.

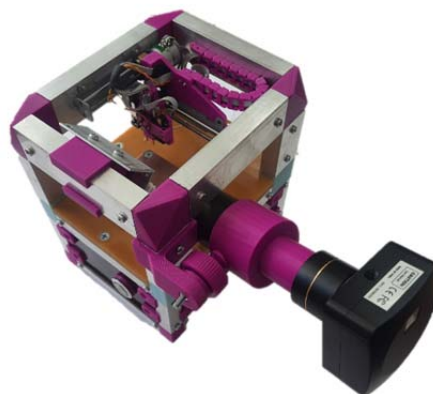


Рис. 2. Внешний вид установки для измерения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок

На рисунке 3 представлена структурная схема установки.

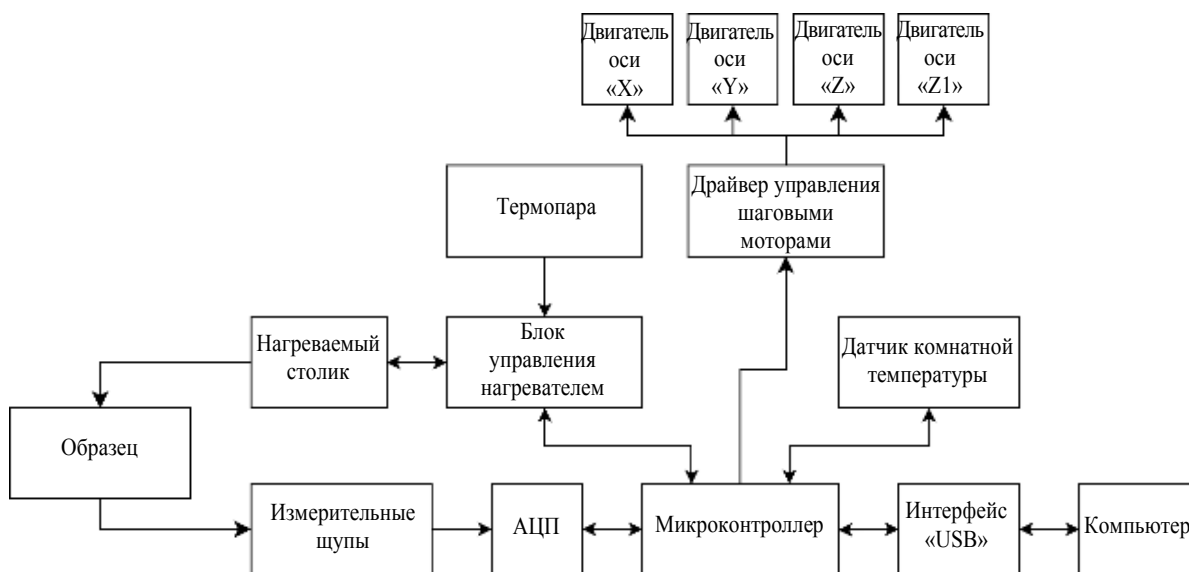


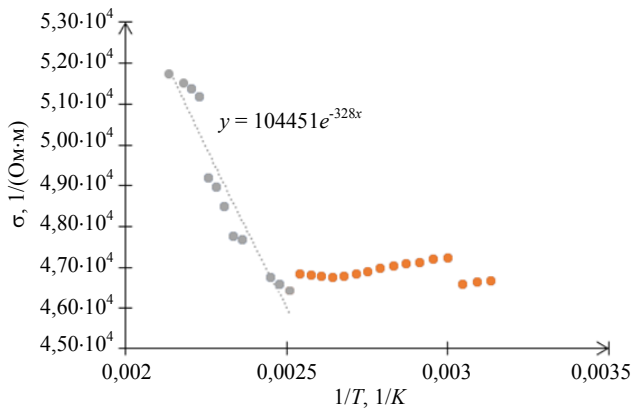
Рис. 3. Структурная схема установки для измерения термо-ЭДС наноразмерных проводящих пленок

Регистрация термо-ЭДС производится 16-битным аналогово-цифровым преобразователем с входным сопротивлением 100 МОм, обработка результатов измерений производится при помощи 8-битного микроконтроллера семейства AVR, ATmega 328p.

### Результаты исследований

Исследуемые в данной работе образцы были получены методом магнетронного распыления из компактной мишени индий-олово

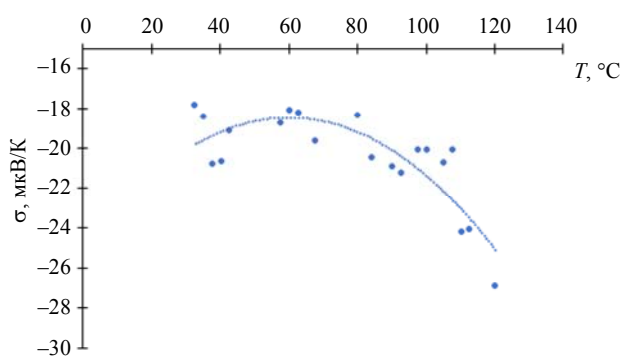
(90 % – In, 10 % – Sn) в газовой среде аргона с добавкой кислорода. Давление кислорода составляло 10–30 % от общего давления в камере [9, 10]. В качестве подложек использовались кремний и боросиликатное стекло. Напыление длилось 20 минут на предварительно разогретую до 350 °С подложку с последующим отжигом в вакууме при температуре 400 °С в течение 30 минут. 4-х зондовым методом было измерено удельное сопротивление полученных пленок, а также снята температурная зависимость электропроводности, которая представлена на рисунке 4.



**Рис. 4. Температурная зависимость электропроводности пленки ИТО**

На зависимости хорошо прослеживаются два участка. На участке до 110 °С заметен металлический тип электропроводности, что свидетельствует о том, что при данных температурах пленка ИТО является вырожденным полупроводником, а электропроводность осуществляется по делокализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Более высокотемпературный участок соответствует прыжковой электропроводности по кислородным вакансиям, представляющим из себя F-центры. Каждый такой центр способствует захвату одного или двух электронов в зависимости от заряда вакансии. На данном участке температурная зависимость электропроводности имеет активационный характер с энергией активации электропроводности порядка 0,05 эВ, что характерно для прыжкового механизма переноса электронов.

Далее при помощи экспериментальной установки была снята зависимость термо-ЭДС от температуры и построена зависимость коэффициента Зеебека контакта вольфрам-ИТО от температуры, которая и представлена на рисунке 5.



**Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента Зеебека контакта вольфрам – ИТО**

Аппроксимируя экспериментальные значения, можно заметить, что в диапазоне температур 30–110 °С значения коэффициента Зеебека малы и практически не зависят от температуры, что характерно для металлов, т. к. основной вклад в возникновение термо-ЭДС в металлах дают электроны, концентрация которых постоянна, а энергия их близка к уровню Ферми, находящемуся зоне проводимости. При данных температурах изменения в распределении электронов на энергетических уровнях незначительны, а, следовательно, и разность потенциалов между двумя металлами, находящимися в соприкосновении, при градиенте температур незначительна и постоянна.

Рассчитанная по формуле 4 концентрация электронов в пленке ИТО при комнатной температуре составила  $2,6 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Уровень Ферми при этом располагается выше дна зоны проводимости на 0,42 эВ.

При температурах выше 110 °С коэффициент Зеебека начинает увеличиваться по модулю и зависеть от температуры, что характерно для невырожденных полупроводников. В таких полупроводниках концентрация свободных носителей заряда зависит от температуры.

Можно заметить корреляцию между температурными зависимостями коэффициента Зеебека и электропроводности, которая при температурах до 110 °С имеет металлический характер, а при более высоких – полупроводниковый, обусловленный наличием кислородных вакансий [4].

Для расчета концентрации электронов в области прыжковой проводимости следует учитывать, что кислородные вакансии в пленках ИТО образуются как в процессе их напыления, так и во время отжига в вакууме. Пленки, исследуемые в данной работе, подвергались отжигу в вакууме в течение 30 минут при температуре 400 °С. Зная данные технологические параметры, можно вычислить концентрацию кислородных вакансий в пленке по следующей формуле:

$$N_v = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{CB}}}{kT}\right), \quad (7)$$

где  $N_0$  – концентрация атомов кислорода при стехиометрическом составе материала пленки,

$E_{\text{св}}$  – энергия связи атома кислорода с молекулой  $\text{In}_2\text{O}_3$ , равная энергии образования кислородной вакансии.

Следует понимать, что не по всем кислородным вакансиям может осуществляться электропроводность, т. к. не все кислородные вакансии находятся в подходящей энергетической зоне для участия в переносе заряда. По этой причине кислородные вакансии, расположенные вдали от уровня Ферми, не могут эффективно участвовать в переносе заряда.

Как правило, в прыжковой проводимости участвуют электроны с энергиями порядка  $kT$  около уровня Ферми. Концентрация таких электронов равна:

$$n = kT \cdot N(E_F), \quad (8)$$

где  $N(E_F)$  – плотность состояний на уровне Ферми, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$N(E_F) = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot E_a}, \quad (9)$$

где  $R$  – длина перескока электрона.

Рассчитанная концентрация кислородных вакансий в пленке составила  $9,93 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация электронов, участвующих в прыжковой проводимости –  $1,8 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Несмотря на высокую концентрацию этих электронов, прирост величины электропроводности после отжига пленок в вакууме не превышает 20 %, что связано с их низкой подвижностью при прыжковом механизме – в данном случае не превышает  $0,3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  [3, 10].

### Заключение

В работе были исследованы термоэлектрические и электрические свойства нанораз-

мерных пленок ИТО, полученных магнетронным распылением, и установлено, что их термо-ЭДС при температурах от 20 до 110 °С монотонно увеличивается (по модулю) и имеет величину от –15 до –25 мкВ/К. Установлена корреляция между температурной зависимостью электропроводности и температурной зависимостью термо-ЭДС. Продемонстрировано, что разработанный макет измерительной установки имеет перспективу для его использования в научных исследованиях

*Работа выполнена по гранту № FEWM-2024-0004 «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов».*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng S., Baillargeat D., Ho H. P., Yong K. T. / Chemical Society Reviews. 2014. Vol. 43. P. 3426–3452.
2. Erickson D., Mandal S., Yang A. / J. Microfluid Nanofluid. 2008. Vol. 4. P. 33.
3. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах. – М.: Мир, 1974.
4. Парфенов О. Е., Шклярук Ф. А. / Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 9. С. 1041–1045.
5. Sytchkova A., Zola D., Bailey L. R., Mackenzie B., Proudfoot G., Tian M., Ulyashin A. / Materials Science and Engineering. 2012. Vol. 178. № 9. P. 586–592.
6. Zhongkai Zhang, Zhaojun Liu, Jiaming Lei, Luntao Chen, Le Li, Na Zhao, Xudong Fang, Yong Ruan, Bian Tian, Libo Zhao / iScience. 2023. Vol. 26. P. 1–19.
7. Rafiq Mulla, Charles W. Dunnill / Carbon Trends. 2021. Vol. 4. P. 1–9.
8. Xiaohui Zhao, Hongmin Wang, Zixiang Zhao, Wanli Zhang / Nanoscale Research Letters. 2017. Vol. 4.
9. Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhidik K., Ynusov I., Trojn P. / Coatings. 2022. Vol. 12. № 12. P. 1868.
10. Смирнов С. В., Минин О. Н., Чистоедова А. А., Петрюк А. Е. / Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2019. Т. 11. № 1. С. 14–18.

## Thermo-EMF of nanosized $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$

A. S. Terekhova\*, L. A. Zelensky, and S. V. Smirnov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050 Russia

\* E-mail [tas18102004@mail.ru](mailto:tas18102004@mail.ru)

Received 27.10.2025; revised 21.11.2025; accepted 27.04.2026

*The results of studies of differential thermo-EMF and Seebeck coefficient of nanosized  $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}$  (ITO) films obtained by magnetron sputtering of a compact target are presented. The dependence of the thermoelectric coefficient of films on temperature is shown, and its correlation with the temperature dependence of electrical conductivity is explained. An automated device for measuring the thermo-EMF of films and distributing it over the surface of the plate in the temperature range from 300 to 450 K has been designed. The results obtained allow us to predict the possibility of further use of ITO films in electronics.*

**Keywords:** ITO films, thermo-EMF, Seebeck coefficient, Fermi level, charge carrier concentration.

### REFERENCES

1. Zeng S., Baillargeat D., Ho H. P., and Yong K. T., *Chemical Society Reviews* **43**, 3426–3452 (2014).
2. Erickson D., Mandal S., and Yang A., *J. Microfluid Nanofluid* **4**, 33 (2008).
3. Mott N. *Electronic processes in non-crystalline substances*. Moscow: Mir, 1974.
4. Parfenov O. E. and Shklyaruk F. A., *Physics and technology of semiconductors* **41** (9), 1041–1045 (2007).
5. Sytchkova A., Zola D., Bailey L. R., Mackenzie B., Proudfoot G., Tian M., and Ulyashin A., *Materials Science and Engineering* **178** (9), 586–592 (2012).
6. Zhongkai Zhang, Zhaojun Liu, Jiaming Lei, Luntao Chen, Le Li, Na Zhao, Xudong Fang, Yong Ruan, Bian Tian, and Libo Zhao, *iScience* **26**, 1–19 (2023).
7. Rafiq Mulla and Charles W. Dunnill, *Carbon Trends* **4**, 1–9 (2021).
8. Xiaohui Zhao, Hongmin Wang, Zixiang Zhao, and Wanli Zhang, *Nanoscale Research Letters* **4** (2017).
9. Zhidik Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhidik K., Ynusov I., and Trojn P., *Coatings* **12** (120), 1868 (2022).
10. Smirnov S. V., Minin O. N., Chistoedova A. A., and Petryuk A. E., *Nanotechnologies: development, application – XXI century* **11** (1), 14–18 (2019).

### Об авторах

**Терехова Александра Сергеевна**, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: [tas18102004@mail.ru](mailto:tas18102004@mail.ru)

**Зеленский Леонид Андреевич**, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: [leonidzelenskij22@mail.com](mailto:leonidzelenskij22@mail.com)

**Смирнов Серафим Всеволодович**, д.т.н., профессор, Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 40). E-mail: [serafim.smirnov@mail.ru](mailto:serafim.smirnov@mail.ru) SPIN-код: 8284-0404, AuthorID: 438551