



УДК 53.09

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-48-58>

### Неаддитивное влияние паров воды и освещения на проводимость пленки диоксида олова при комнатной температуре

*В. В. Симаков, И. В. Синёв, С. Б. Вениг*

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83

E-mail: viatcheslav.simakov@gmail.com, SinevIV@info.sgu.ru, sergey.venig@gmail.com

Автор для переписки Симаков Вячеслав Владимирович, viatcheslav.simakov@gmail.com

Поступила в редакцию 25.04.2018; принята к публикации 29.10.2018

**Тема и цель исследования.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния паров воды и интенсивности освещения светодиода на проводимость тонкой пленки диоксида олова при комнатной температуре. Известно, что использование освещения активных слоев сенсоров позволяет снизить их рабочую температуру, что расширяет область применения сенсоров и мультисенсорных систем на их основе. Целью работы является исследование совместного влияния освещения и воздействия паров воды на проводимость пленок диоксида олова. **Методы и материалы.** Изучалась газочувствительность сенсоров на основе тонких пленок диоксида олова, сформированных ВЧ магнетронным методом распыления стехиометрической мишени SnO<sub>2</sub>. Сенсор представлял собой прямоугольную пластину поликора, на которой были сформированы параллельные контакты из нержавеющей стали. Длина контактов 10 мм, зазор между контактами 50 мкм. Толщина активного слоя составляла 0.8 мкм. Газовые пробы, содержащие пары воды, составлялись путем барботирования деионизированной воды потоком синтетического воздуха. Содержание паров воды в газовой пробе определялось соотношением потоков паровоздушной смеси и синтетического воздуха. **Результаты.** Впервые показано, что при низких уровнях освещения проводимость тонкой пленки диоксида олова при напуске газовых проб увеличивается, а при высоких уровнях освещения – уменьшается. Выполнен численный расчет концентрационных и люксамперных характеристик газочувствительных структур. **Обсуждение.** Результаты проведенных расчетов по предложенной модели показали, что увеличение или уменьшение проводимости образцов при напуске детектируемого газа определяется положением уровня Ферми в зерне поликристаллического образца до напуска анализируемого газа, которое может контролироваться интенсивностью освещения. **Заключение.** Полученные результаты могут быть использованы при создании мультисенсорных систем на основе полупроводниковых слоев для детектирования и распознавания примесей газов в окружающей атмосфере.

*Ключевые слова:* диоксид олова, газочувствительность, фоточувствительность, неаддитивность влияния внешних воздействий.

*Образец цитирования:* Симаков В.В., Синёв И.В., Вениг С.Б. Неаддитивное влияние паров воды и освещения на проводимость пленки диоксида олова при комнатной температуре // Изв. вузов. ПНД. 2018. Т. 26, № 6. С. 48–58. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-48-58>

*Финансовая поддержка.* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-07-00821.

## Non-additive influence of water vapor and lighting on the conductivity of tin dioxide film at room temperature

*V. V. Simakov, I. V. Sinev, S. B. Venig*

Saratov State University

83, Astrakhanskaya, 410012 Saratov, Russia

E-mail: viatcheslav.simakov@gmail.com, SinevIV@info.sgu.ru, sergey.venig@gmail.com

Correspondence should be addressed to Simakov Viatcheslav V., viatcheslav.simakov@gmail.com

Received 25.04.2018, accepted for publication 29.10.2018

**Subject and purpose of the study.** The paper presents the results of experimental studies of the effect of water vapor and light intensity on the conductivity of a thin film of tin dioxide at room temperature. It is known that the use of illumination of active layers of sensors allows to reduce their operating temperature, which expands the application field of sensors and multisensor systems based on them. The aim of the paper is to investigate the joint influence of lighting and the effect of water vapor on the conductivity of tin dioxide films. **Methods and materials.** The sensitivity of gas sensors based on thin films of tin dioxide formed by a high-frequency magnetron method of sputtering a stoichiometric target SnO<sub>2</sub> was studied. The sensor was a rectangular alumina plate, on which parallel stainless steel contacts were formed. The length of the contacts is 10 mm, the gap between the contacts is 50 μm. The thickness of the active layer was 0.8 μm. Gas samples containing water vapor were prepared at the bubbler by bubbling of deionized water in stream of synthetic air. Content of water vapor in the gas sample was determined by the ratio in the stream of steam-air mixture and synthetic air. **Results.** It is shown for the first time that, at low illumination levels, the conductivity of a thin film of tin dioxide when gas samples are launched increases, and at high illumination levels, the conductivity decreases. A numerical calculation of the concentration and luxampere characteristics of gas sensitive structures is performed. **Discussion.** Results of calculations on the basis of proposed model showed that the increase or decrease in the conductivity of samples at a presence of test gas is determined by initial position of the Fermi level in the grain of a polycrystalline sample, which can be controlled by intensity of illumination. **Conclusion.** Results obtained can be used to create multisensor systems based on semiconductor layers for detection and recognition of gas impurities in the ambient atmosphere.

*Key words:* tin dioxide, gas sensitivity, photosensitivity, nonadditivity of external influences.

*Reference:* Simakov V.V., Sinev I.V., Venig S.B. Non-additive influence of water vapor and lighting on the conductivity of tin dioxide film at room temperature. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 48–58. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-6-48-58>

*Acknowledgements.* Reported study was funded by RFBR, research project 16-07-00821.

### Введение

На сегодняшний момент достигнуты существенные успехи в создании систем анализа состава окружающей среды, решены вопросы формирования на единой подложке методами микроэлектроники чувствительного слоя и систем управления работой таких устройств [1–3]. Применение полупроводниковых металлооксидных слоев в системах анализа многокомпонентных газовых смесей обеспечивает их низкую стоимость и энергопотребление [4, 5]. Использование в газовых сенсорах широкозонных металлооксидных материалов позволяет детектировать широкий спектр газов органической и неорганической природы. Однако, к недостаткам таких газочувствительных материалов можно отнести необходимость их нагрева до температуры порядка 300°C, что, по-видимому, обеспечивает присутствие на поверхности активного слоя сенсора химически активных форм кислорода [6, 7]. Наряду с увеличением энергопотребления таких приборов, возникают ограничения на их использование во взрывоопасных средах и для детектирования биологических объектов. Кроме того, нагрев активных слоев сенсоров приводит к снижению стабильности их параметров из-за активации диффузионных процессов в материале газочувствительного слоя [8].

Известно, что освещение поверхности сенсора позволяет снизить требуемую для работы температуру, в ряде случаев вплоть до комнатной [9]. Авторами работ [10–13] показано, что для широкозонных газочувствительных материалов в качестве внешнего излучения можно использовать и свет из видимого диапазона.

Согласно ряду опубликованных работ, пары этанола и воды в воздухе оказывают восстанавливающее действие на проводимость слоев диоксида олова, то есть при экспозиции в пробе проводимость увеличивается. Однако авторы работ [14, 15] обнаружили, что проводимость диоксида олова при экспозиции в некоторых газовых пробах может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от других физических воздействий, оказываемых на активный слой сенсора (например, рабочая температура или концентрация анализируемого газа). Для объяснения наблюдаемых экспериментальных фактов предложен ряд гипотез, которые в настоящее время являются предметом обсуждения.

В этой работе впервые показано, что проводимость газового сенсора на основе тонкой пленки диоксида олова при напуске паров воды может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от интенсивности освещения.

## 1. Образцы и методика измерений

Слои диоксида олова формировались методом ВЧ-магнетронного распыления стехиометрической мишени  $\text{SnO}_2$  в смеси аргона и кислорода [16]. Поверх пленки диоксида олова через маску наносилась система контактов. Для освещения сенсора использовался светодиод марки DFL-5AP4SC-400 с излучением в полосе длин волн 397...409 нм с максимумом на длине волны 402 нм. Интенсивность освещения контролировалась током через светодиод с помощью источника питания PST-3201. В качестве количественной меры интенсивности освещения использовался световой поток  $I$ , лм. Исследования электрофизических свойств полученных газочувствительных структур, как в темноте, так и при их освещении, проводились с использованием аппаратно-программного комплекса [17].

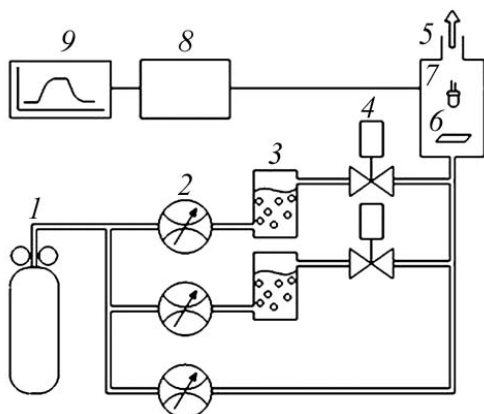


Рис. 1. Схема измерительной установки: 1 – баллон с синтетическим воздухом; 2 – регуляторы расхода газа; 3 – барботер; 4 – электромагнитный клапан; 5 – рабочая камера; 6 – образец  $\text{SnO}_2$ ; 7 – светодиод; 8 – мультиметр; 9 – компьютер

Fig. 1. Scheme of measuring setup: 1 – cylinder with synthetic air; 2 – gas flow regulators; 3 – bubbler; 4 – solenoid valve; 5 – working chamber; 6 – sample of  $\text{SnO}_2$ ; 7 – LED; 8 – multimeter; 9 – computer

Газовые пробы, содержащие пары воды, составлялись путем барботирования деионизированной воды потоком синтетического воздуха (20.5% кислорода в азоте). Содержание паров воды в газовой пробе определялось соотношением потоков паровоздушной смеси и очищенного воздуха. Для получения газовых проб из баллона 1 (рис. 1) при помощи регуляторов расхода газа EL-Flow (BronkhorstHigh-Tech) 2 подавался осушенный воздух в газопроводную систему и поступал в барботер 3. Через электромагнитный клапан (SMC) 4 паровоздушная смесь поступала в измерительную камеру 5, в которой расположены газочувствительный слой 6 с контактной системой и светодиод 7. Общий поток через измерительную камеру во всех экспериментах поддерживался на уровне 100 норм.мл/мин. Температура сенсоров и газовых проб во всех экспериментах поддержи-

ввалась термостатом ТС-1/80 на уровне 30°C. Напуск газовых проб осуществлялся в течение 10 минут, а затем 60 минут камера продувалась потоком очищенного воздуха. В ходе экспериментов сенсор освещался светодиодом с различной интенсивностью света, причем освещение проводилось непрерывно в течение всего времени экспериментов.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В темноте при ступенчатом воздействии газовых проб, содержащих пары воды, проводимость пленки диоксида олова увеличивалась (рис. 2, *a*), что может быть связано с вытеснением с поверхности зерна адсорбированных частиц кислорода в отрицательно заряженной форме молекулами воды. С увеличением содержания паров воды в газовой пробе проводимость образцов увеличивалась, причем на концентрационной зависимости проводимости в парах воды можно выделить три характерных области: область низких концентраций (менее 20 об. %), где проводимость образца изменяется незначительно; промежуточная область концентраций (20...60 об. %), при которых проводимость образца увеличивается наиболее существенно; область высоких концентраций (более 60 об. %), где проводимость образца стремится к насыщению.

Освещение пленки диоксида олова в атмосфере сухого воздуха приводило к обратимому увеличению ее проводимости (рис. 3, *a*), что может быть связано с фотогенерацией электронов с глубоких уровней ловушек в объеме зерна. При увеличении светового потока стационарное значение проводимости образца возрастало (рис. 3, *b*). В области малых интенсивностей (менее 0.05 лм) проводимость линейно увеличивалась с ростом светового потока, а при величинах светового потока свыше 0.1 лм проводимость имела тенденцию к насыщению, что может быть связано с истощением концентрации заполненных электронами ловушек.

В атмосфере паров воды освещение пленки диоксида олова приводило к обратимому увеличению ее проводимости (рис. 4, *a*), после выключения освещения проводимость уменьшалась до своего темнового значения. Обратимое изменение проводимости пленки диоксида олова указывало на отсутствие фотостимулированной перестройки дефектов в материале и могло быть

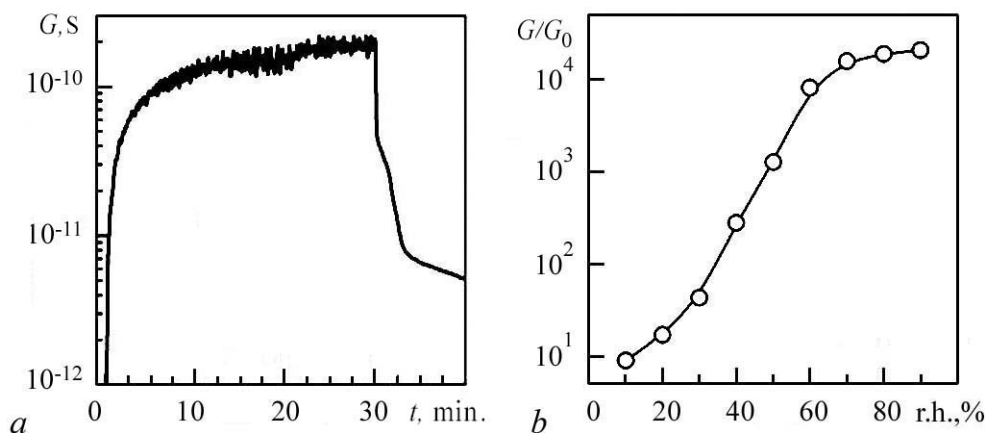


Рис. 2. Влияние паров воды на проводимость пленки диоксида олова в темноте: *a* – динамика изменения проводимости при ступенчатом напуске газовых проб, содержащих 30 об. % паров воды; *b* – концентрационная зависимость проводимости ( $G$  – проводимость образца в газовой пробе, содержащей пары воды;  $G_0$  – проводимость образца в синтетическом воздухе)

Fig. 2. Effect of water vapor on the conductivity of a tin dioxide film in the dark: *a* – dynamics of the conductivity with filling gas samples containing 30 vol. % water vapor; *b* – concentration dependence of conductivity ( $G$  – sample conductivity in the air containing water vapor;  $G_0$  – sample conductivity in the synthetic air)

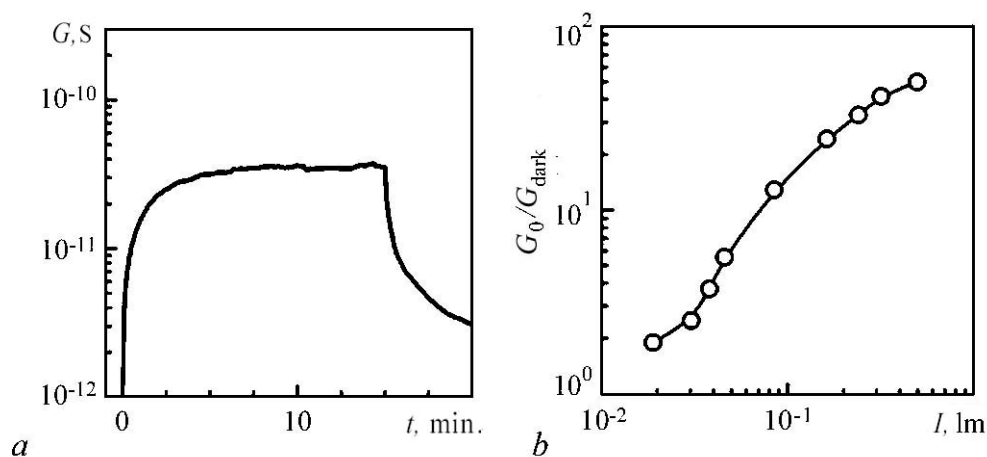


Рис. 3. Влияние освещения на проводимость пленки диоксида олова в атмосфере сухого воздуха: *a* – динамика изменения проводимости при освещении, световой поток  $I=0.3$  лм; *b* – зависимость проводимости от величины светового потока ( $G_{\text{dark}}$  – проводимость образца в темноте)

Fig. 3. Influence of illumination on the conductivity of a film of tin dioxide in an atmosphere of dry air: *a* – the dynamics of the conductivity change by illuminating with a light flux  $I=0.3$  lm; *b* – dependence of the conductivity on the magnitude of the light flux ( $G_{\text{dark}}$  – sample conductivity in the dark)

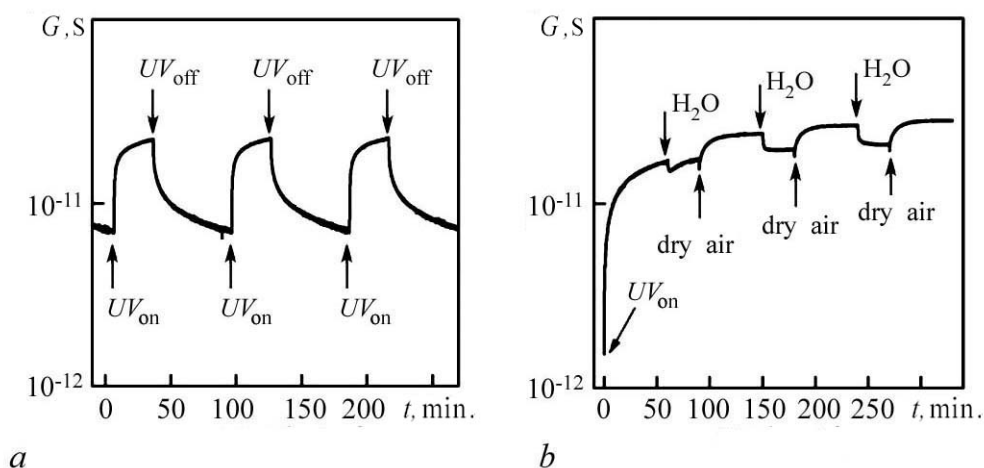


Рис. 4. Динамика изменения проводимости сенсора: *a* – в темноте при напуске паров воды; *b* – при освещении светодиодами в атмосфере паров воды (концентрация паров воды в экспериментах составляла 50 об.%, световой поток 0.1 лм)

Fig. 4. Dynamics of the sensor conductivity: *a* – in the dark with the release of water vapor; *b* – under LED illumination in an atmosphere of water vapor (the concentration of water vapor in the experiments was 50 vol. %, luminous flux of 0.1 lm)

связано с процессами выброса электронов с уровней ловушек в объеме материала зерна. Однако при освещении напуск газовых проб, содержащих пары воды, приводил к уменьшению проводимости диоксида олова (рис. 4, *b*).

### 3. Теоретические расчеты и их обсуждение

При адсорбции частиц из газовой фазы, на поверхности широкозонных полупроводников образуются локализованные поверхностные состояния акцепторного (газ-окислитель), либо донорного типа (газ-восстановитель). Энергетическое положение поверхностных уровней, со-

ответствующих этим состояниям, определяется как электронным сродством адсорбирующихся частиц, свойствами адсорбента, так и природой химической связи, возникающей между адсорбатом и адсорбентом [18–20].

Появление в окружающей среде частиц газа-окислителя и/или газа-восстановителя приводит к заполнению центров адсорбции частицами из газовой фазы. В рамках теории Ленгмюра, адсорбция частиц возможна только на незаполненных центрах адсорбции с поверхностной плотностью  $N_s$ , не взаимодействующих между собой, а десорбция частиц поддерживается за счет слабой, незаряженной формы адсорбции

$$\alpha_a P_a (N_s - N_a - N_d) = \nu N_a (1 - f_a) \exp\left(-\frac{Q_a}{kT}\right), \quad (1)$$

$$\alpha_d P_d (N_s - N_a - N_d) = \nu N_d (1 - f_d) \exp\left(-\frac{Q_d}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha = \kappa A / \sqrt{2\pi m k T_0}$  – коэффициент изотермы Ленгмюра,  $\kappa$  – коэффициент аккомодации,  $A$  – площадь центра адсорбции,  $m$  – масса молекулы адсорбированного газа,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_0$  – температура газа;  $\nu$  – характерная частота фонона;  $P$  – парциальное давление газа;  $Q$  – теплота десорбции частицы газа;  $N_a$ ,  $N_d$  и  $f_a = n_s / (n_s + n_a)$ ,  $f_d = n_d / (n_s + n_d)$  – поверхностная плотность частиц и вероятность ионизации поверхностных состояний акцепторного и донорного типов, соответственно;  $n_s = n(0)$  – концентрация электронов в зоне проводимости на поверхности зерна;  $n_a = g_a N_c \exp(-(E_c - E_a)/(kT))$  и  $n_d = g_d N_c \exp(-(E_c - E_d)/(kT))$  – концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень Ферми совпадает с поверхностным примесным уровнем;  $g$  – фактор вырождения примесного уровня;  $N_c$  – плотность состояний вблизи дна зоны проводимости  $E_c$ ;  $E_a$  и  $E_d$  – положение акцепторных и донорных уровней относительно дна зоны проводимости, соответственно;  $T$  – температура зерна.

Заполнение носителями заряда локализованных поверхностных состояний, индуцированных адсорбированными частицами газов, приводит к накоплению электрического заряда  $Q_s$  на поверхностях зерен

$$Q_s = -q N_a f_a + q N_d f_d, \quad (3)$$

где  $q > 0$  – величина заряда электрона.

Поверхностный заряд  $Q_s$  приводит к истощению или обогащению объема зерна основными носителями заряда, вызывая, таким образом, появление электрического поля. В рамках одномерной задачи, распределение электрического поля в объеме зерна невырожденного полупроводника  $n$ -типа определялось из решения уравнения Пуассона

$$\varepsilon \varepsilon_0 \frac{dE(x)}{dx} = q(N_D^+ + N_t^+ - n) \quad (4)$$

совместно с уравнением для полного тока в объеме зерна

$$j = q\mu_n n E + qD_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $E$  – напряженность электрического поля;  $x$  – расстояние от поверхности зерна;  $N_D^+$  – концентрация ионизованных доноров;  $n$  – концентрация электронов в объеме зерна поликристаллического образца;  $N_t^+ = N_t n_t^* / (n + n_t^*)$  – концентрация ионизованных ловушек за счет фотогенерации носителей заряда с глубоких уровней  $E_t$  при освещении образца;  $N_t$  – концентрация ловушек в объеме зерна;  $n_t^* = n_t + \sigma_i I / (\sigma_t v_{th})$  – параметр уровня ловушек, зависящий от светового потока;

$n_t = g_t N_c \exp -(E_c - E_t)/(kT)$  – концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень Ферми совпадает с уровнем ловушек;  $v_{th}$  – тепловая скорость электронов;  $\sigma_i$  – сечение фотоионизации электрона;  $\sigma_t$  – сечения захвата электронов на уровнях ловушек;  $I$  – световой поток;  $\mu_n$  – подвижность электронов;  $D_n = kT/(q\mu_n)$  – коэффициент диффузии электронов.

Предполагалось, что напряженность приложенного к зерну внешнего электрического поля существенно меньше напряженности поля  $E$ , которое индуцируется зарядом на поверхности зерна  $Q_s$ , тогда ток через зерно равен нулю  $j = 0$  и распределение концентрации носителей заряда в объеме зерна представлялось в виде:

$$n(x) = N_D^+ \exp \left( -\frac{q}{kT} \int_0^x E(r) dr \right). \quad (6)$$

Для решения уравнения Пуассона формулировались граничные условия в интегральном виде – электронейтральность зерна в целом

$$\int_V q(N_D^+ + N_t^+ - n) dV = \int_S Q_s dS, \quad (7)$$

где  $V$  и  $S$  – объем и площадь поверхности зерна, соответственно. Физический смысл условия электронейтральности – при малых напряженностях внешнего электрического поля инжекция электронов в объем зерна отсутствует, и заряд на поверхности зерна формируется только за счет электронов из его объема.

Решение уравнения Пуассона (4) с учетом выражения (6) и условия (7) позволяет найти распределение напряженности электрического поля вдоль зерна поликристаллического слоя. Следует отметить, что сформулированная задача носила самосогласованный характер, то есть распределение электрического поля (4), а следовательно, и концентрации электронов (6) зависит от заряда на поверхности зерна (3), который, в свою очередь, зависит от концентрации электронов на поверхности зерна (1).

На рис. 5, а представлены результаты расчетов проводимости зерна поликристаллического образца при различных концентрациях детектируемого газа в темноте и при освещении. Концентрационные зависимости носят нелинейный характер: и в темноте, и при освещении, как в

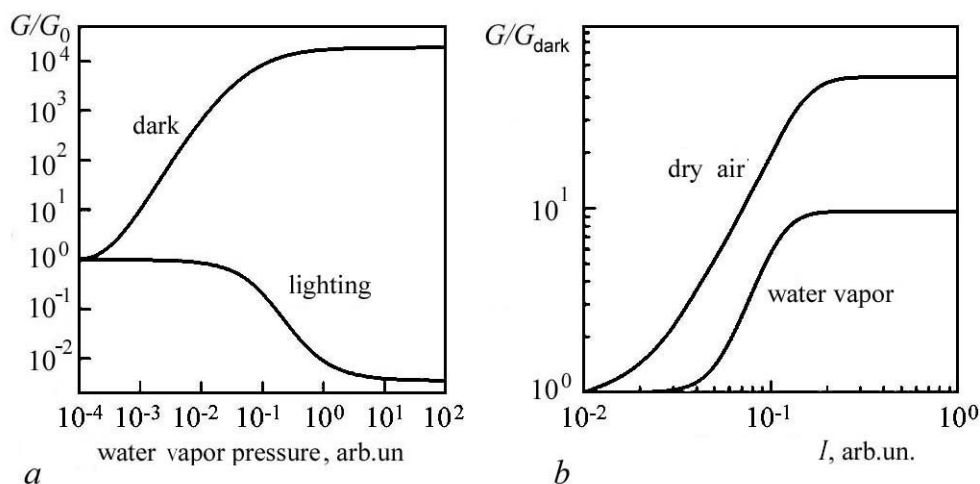


Рис. 5. Влияние паров воды (а) и освещения  $I$  (б) на проводимость пленки диоксида олова при температуре 25°C  
 Fig. 5. Influence of water vapor (a) and illumination  $I$  (b) on the conductivity of a tin dioxide film at a temperature of 25°C

области малых, так и в области больших концентраций проводимость образца слабо зависит от содержания анализируемого газа в пробе; в области промежуточных концентраций проводимость в темноте увеличивается, а при освещении уменьшается.

Двойственное влияние анализируемого газа на проводимость образца можно объяснить в рамках предположения, что адсорбированные частицы анализируемого газа в запрещенной зоне материала зерна индуцируют глубокие поверхностные состояния как донорного, так и акцепторного типа, с энергией меньшей, чем акцепторный уровень кислорода. При адсорбции частиц детектируемого газа происходит вытеснение частиц кислорода с адсорбционных центров и перераспределение заряда между поверхностными состояниями, индуцированными адсорбированным кислородом и частицами анализируемого газа (воды).

Если уровень Ферми в темноте в кислородсодержащей атмосфере (воздухе) лежит ниже примесных уровней кислорода и воды, то вследствие термической ионизации электронов с донорных центров воды происходит частичное заполнение глубоких акцепторных центров воды, и увеличение концентрации электронов в объеме зерна, поэтому проводимость образцов увеличивается (рис. 5, а, кривая «dark»). Напротив, при освещении, когда уровень Ферми лежит выше примесных уровней воды, ионизация донорных состояний частиц воды затруднена, а акцепторные состояния кислорода замещаются более глубокими акцепторными уровнями, связанными с адсорбированными частицами воды, и проводимость образцов уменьшается (кривая «lighting»).

#### 4. Теоретические расчеты и их обсуждение

На рис. 5, б представлены результаты расчетов проводимости поликристаллического образца при различных интенсивностях освещения в атмосфере сухого воздуха (кривая «dry air») и в атмосфере паров воды (кривая «water vapor»). Зависимости носят монотонный нелинейный характер: и в атмосфере сухого воздуха, и в присутствии паров воды, как в области малых, так и в области больших интенсивностей освещения проводимость образца слабо зависит от величины светового потока.

Увеличение проводимости при освещении образца связано с фотогенерацией электронов с глубоких уровней ловушек в объеме зерна поликристаллического слоя, поэтому и в атмосфере сухого воздуха (кислорода), и в присутствии паров воды проводимость увеличивается.

#### Выводы

На основе полученных экспериментальных и теоретических результатов выявлены основные особенности влияния паров воды и освещения на проводимость пленки диоксида олова при комнатной температуре. Показано неаддитивное влияние паров воды и освещения на проводимость образцов: при раздельном воздействии паров воды и освещения проводимость пленок диоксида олова увеличивается, а при одновременном воздействии проводимость может уменьшаться. Результаты проведенных расчетов по предложенной модели показали, что увеличение или уменьшение проводимости образцов при напуске детектируемого газа определяется положением уровня Ферми в зерне поликристаллического образца до напуска анализируемого газа, которое может контролироваться интенсивностью освещения.

В заключение следует отметить, что возможность оптического управления характером изменения (увеличение или уменьшение) проводимости тонких пленок диоксида олова открывает перспективу разработки нового типа сенсоров газа, работающих при комнатной температуре – фотохеморезисторов.



## Библиографический список

1. *Simakov V., Voroshilov A., Grebennikov A., Kucherenko N., Yakusheva O., Kisin V.* Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO<sub>2</sub> sensors // *Sens. Actuators B. Chemical*. 2009. Vol. 137. P. 456–461.
2. *Jaaniso R., Tan O.K.* Semiconductor Gas Sensors. Cambridge: Elsevier, 2013. 552 p.
3. *Natale C., Ferrari V., Ponzoni A., Sberveglieri G., Ferrari M.* Sensors and Microsystems. Heidelberg: Springer, 2014. 439 p.
4. *Korotcenkov G.* Handbook of Gas Sensor Materials. New York: Springer, 2014. 454 p.
5. *Patel H.* The Electronic Nose: Artificial Olfaction Technology. New Delhi: Springer, 2013. 247 p.
6. *Ao D., Ichimura M.* UV-irradiation effects on hydrogen sensors based on SnO<sub>2</sub> thin films fabricated by the photochemical deposition // *Solid-State Electronics*. 2012. Vol. 69, no. 3. P. 1–3.
7. *Kohl C.-D., Wagner T.* Gas Sensing Fundamentals. Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 342 p.
8. *Gründler P.* Chemical Sensors. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 273 p.
9. *Comini E., Faglia G., Sberveglieri G.* UV light activation of tin oxide thin films for NO<sub>2</sub> sensing at low temperatures // *Sens. Actuators B. Chemical*. 2001. Vol. 78. P. 73–77.
10. *Гуляев А.М., Ван Л.В., Сарач О.Б., Мухина О.Б.* О воздействии оптического излучения на чувствительность газовых сенсоров на основе пленок SnO<sub>2-x</sub> // *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42, № 6. P. 742–746.
11. *Chizhov A.S., Rumyantseva M.N., Vasiliev R.B., Filatova D.G., Drozdov K.A., Krylov I.V., Abakumov A.M., Gaskov A.M.* Visible light activated room temperature gas sensors based on nanocrystalline ZnO sensitized with CdSe quantum dots // *Sens. Actuators B. Chemical*. 2014. Vol. 205. P. 305–312.
12. *Рембеза С.И., Свистова Т.В., Кошелева Н.Н., Овсянников С.В., Аль Тамееми В.М.К.* Влияние оптического излучения на адсорбционные процессы взаимодействия газов-восстановителей с пленкой SnO<sub>2</sub> // *Письма в Журнал технической физики*. 2015. Т. 41, № 23. С. 32–39.
13. *Симаков В.В., Синёв И.В., Смирнов А.В., Осыко И.Д., Гребенников А.И., Сергеев С.А.* Влияние освещения на газочувствительность тонких плёнок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. Т. 19, № 1. P. 34–40.
14. *Arulsamy A.D., Eleršič K., Modic M., Cvelbar U., Mozetič M.* Carrier-type transitions in gas-sensing oxides and nanostructures // *ChemPhysChem*. 2010. Vol. 11. P. 3704–3712.
15. *Balouria V., Kumar A., Samanta S., Singh A., Debnath A.K., Mahajan A., Bedi R.K., Aswal D.K., Gupta S.K.* Nano-crystalline Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films for ppm level detection of H<sub>2</sub>S // *Sens. Actuators B: Chemical*. 2013. Vol. 181. P. 471–478.
16. *Симаков В.В., Синёв И.В., Смирнов А.В., Сякина С.Д., Гребенников А.И., Кисин В.В.* Формирование пленок диоксида олова с вертикально ориентированными нанопорами // *Нанотехника*. 2011, № 3. С. 45–46.
17. *Симаков В.В., Никитина Л.В., Синёв И.В.* Аппаратно-программный комплекс многопараметрического распознавания многокомпонентных газовых смесей на основе мультисенсорных микросистем // *Башкирский химический журнал*. 2010. Т. 17. С. 125–127.
18. *Kiselev V.F., Krylov O.V.* Adsorption Processes on Semiconductor and Dielectric Surfaces. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 287 p.
19. *Silva J.C.M., dos Santos E.C., de Oliveira A., Heine T., de Abreu H.A., Duarte H.A.* Adsorption

of water, sulfates and chloride on arsenopyrite surface // *Applied Surface Science*. Vol. 434, 15 March 2018. P. 389–399.

20. Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review // *Materials Science and Engineering: B*. 2018. Vol. 229. P. 206–217.

## References

1. Simakov V., Voroshilov A., Grebennikov A., Kucherenko N., Yakusheva O., Kisin V. Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO<sub>2</sub> sensors. *Sens. Actuators B. Chemical*, 2009, vol. 137, pp. 456–461.
2. Jaaniso R., Tan O.K. *Semiconductor Gas Sensors*. Cambridge: Elsevier, 2013. 552 p.
3. Natale C., Ferrari V., Ponzoni A., Sberveglieri G., Ferrari M. *Sensors and Microsystems*. Heidelberg: Springer, 2014. 439 p.
4. Korotcenkov G. *Handbook of Gas Sensor Materials*. New York: Springer, 2014. 454 p.
5. Patel H. *The Electronic Nose: Artificial Olfaction Technology*. New Delhi: Springer, 2013. 247 p.
6. Ao D., Ichimura M. UV-irradiation effects on hydrogen sensors based on SnO<sub>2</sub> thin films fabricated by the photochemical deposition. *Solid-State Electronics*, 2012, vol. 69, no. 3, pp. 1–3.
7. Kohl C.-D., Wagner T. *Gas Sensing Fundamentals*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 342 p.
8. Gründler P. *Chemical Sensors*. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 273 p.
9. Comini E., Faglia G., Sberveglieri G. UV light activation of tin oxide thin films for NO<sub>2</sub> sensing at low temperatures. *Sens. Actuators B. Chemical*, 2001, vol. 78, pp. 73–77.
10. Gulyaev A.M., Van L.V., Sarach O.B., Mukhina O.B. Light-enhanced sensitivity of SnO<sub>2-x</sub> gas sensors. *Semiconductors*, 2008, vol. 42, no. 6, pp. 726–730.
11. Chizhov A.S., Rumyantseva M.N., Vasiliev R.B., Filatova D.G., Drozdov K.A., Krylov I.V., Abakumov A.M., Gaskov A.M. Visible light activated room temperature gas sensors based on nanocrystalline ZnO sensitized with CdSe quantum dots. *Sens. Actuators B. Chemical*, 2014, vol. 205, pp. 305–312.
12. Rembeza S.I., Svistova T.V., Kosheleva N.N., Ovsyannikov S.V., Al Tameemi V.M.K. Influence of light on the adsorption processes during interaction between reducer gases and a SnO<sub>2</sub> film. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 12, pp. 1128–1131.
13. Simakov V.V., Sinev I.V., Smirnov A.V., Osyko I.D., Grebennikov A.I., Sergeyev S.A. Influence of light on the gas sensitivity of the thin films of tin dioxide to ethanol vapors at room temperature. *Nano- and microsystems technology*, 2017, Vol. 19, no. 1, pp. 34–40 (in Russian).
14. Arulsamy A.D., Eleršič K., Modic M., Cvelbar U., Mozetič M. Carrier-type transitions in gas-sensing oxides and nanostructures. *ChemPhysChem*, 2010, vol. 11, pp. 3704–3712.
15. Balouria V., Kumar A., Samanta S., Singh A., Debnath A.K., Mahajan A., Bedi R.K., Aswal D.K., Gupta S.K. Nano-crystalline Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films for ppm level detection of H<sub>2</sub>S. *Sens. Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 181, pp. 471–478.
16. Simakov V.V., Sinev I.V., Smirnov A.V., Syakina S.D., Grebennikov A.I., Kisin V.V. Formation of tin dioxide layers with vertically aligned nanopores. *Nanotechnics*, 2011, no. 3, pp. 45–46 (in Russian).
17. Simakov V.V., Nikitina L.V., Sinev I.V. Hardware-in-the-loop complex of polyvalent recognition of multicomponent gas mixtures based on multisensory microsystems. *Bashkir Chemical Journal*, 2010, vol. 17, pp. 125–127 (in Russian).

18. Kiselev V.F., Krylov O.V. Adsorption Processes on Semiconductor and Dielectric Surfaces. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 287 p.
19. Silva J.C.M., dos Santos E.C., de Oliveira A., Heine T., de Abreu H.A., Duarte H.A. Adsorption of water, sulfates and chloride on arsenopyrite surface. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 434, 15 March 2018, pp. 389–399.
20. Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 2018, vol. 229, pp. 206–217.



*Симаков Вячеслав Владимирович* – родился в Саратове (1973), окончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (1995). После окончания работал в Саратовском государственном техническом университете. В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, а в 2006 году – доктора технических наук. Область научных интересов: газовая сенсорика, создание мультисенсорных микросистем Lab on Chip для распознавания многокомпонентных газовых смесей и запахов. Опубликовал более 150 научных трудов по направлениям, указанным выше. В настоящее время – профессор кафедры материаловедения, технологии и управления качеством Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: viatcheslav.simakov@gmail.com



*Синёв Илья Владимирович* – родился в Саратовской области (1987). Получил высшее образование на факультете нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета по специальности микроэлектроника и твердотельная электроника. Продолжил образование в аспирантуре, в 2014 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В настоящее время работает в должности доцента на кафедре материаловедения, технологии и управления качеством Саратовского государственного университета. Область научных интересов – создание и изучение газочувствительных тонких пленок.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: SinevIV@info.sgu.ru



*Вениг Сергей Борисович* – родился в Саратове (1957), окончил Саратовский государственный университет (1979). После окончания СГУ работал в ОКБ ПО «Тантал». С 1981 года работает в СГУ, в настоящее время декан факультета нано- и биомедицинских технологий. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1988) и доктора физико-математических наук (1999) в области радиофизики, физики полупроводников и диэлектриков, применения нелинейной динамики в этих областях науки. Опубликовал 200 научных работ по направлениям, указанным выше, а также в области материаловедения, нанотехнологий, биофизики, медицинской физики. Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
 E-mail: sergey.venig@gmail.com