

## Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха

Д. Е. Шашин<sup>1✉</sup>, А. Д. Дьячков<sup>1</sup>, А. Л. Романов<sup>1</sup>, Н. Р. Костик<sup>2</sup>,  
С. А. Тарасов<sup>2</sup>, М. Е. Ильин<sup>2,3</sup>, Н. В. Каманина<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

<sup>4</sup>АО "НПО ГОИ им. С. И. Вавилова", Санкт-Петербург, Россия

✉ ShashinDE@volgatech.net

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время ведется интенсивный поиск и исследование сред, позволяющих создавать современные газовые сенсоры, а также устройства для очистки воды и воздуха. Среди различных методов очистки воздуха и воды именно фотокатализ занимает перспективное место. Из множества материалов с данным эффектом, благодаря своим свойствам, сильно выделяется диоксид титана. Самый подходящий для получения данного материала метод – реактивное магнетронное распыление.

**Цель работы.** Изучение влияния параметров метода синтеза на варьирование эффективности фотокатализатора на основе  $\text{TiO}_2$  для его дальнейшего применения в области очистки воды и использования в качестве газовых сенсоров.

**Материалы и методы.** В ходе работы были получены две серии по 5 образцов. При получении первой серии варьировалось время напыления (3, 7, 10, 15, 30 мин), а при получении второй – соотношение аргона и кислорода в реактивной смеси (90/10, 70/30, 50/50, 30/70, 10/90 %). Далее каждый образец из обеих серий подвергался облучению в течение 2 ч, а затем исследовался на гидрофильность с помощью прибора ОСА 15 ЕС.

**Результаты.** По результатам исследования были получены две зависимости, а именно: краевого угла смачивания от времени напыления и угла смачивания от содержания кислорода в реактивной смеси. Было выявлено, что данный метод подходит для получения фотокаталитических пленок диоксида титана. Показано, что при увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Увеличение времени напыления в 10 раз (3 мин против 30 мин) не вызвало каких-то серьезных различий в фотокаталитических и гидрофильных свойствах двух данных образцов. Экспериментально доказано, что наиболее фотоактивные пленки можно синтезировать при соотношении  $\text{Ar}/\text{O}_2$  90/10 и 10/90 %.

**Заключение.** Результаты описываемой работы доказывают, что уже на данном этапе разработанную фотокаталитическую пленку диоксида титана вполне можно рекомендовать для решения ряда задач по очистке воды и применения в качестве газовых сенсоров.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, диоксид титана, магнетронное распыление, фотокатализ, гидрофильность, смачиваемость

**Для цитирования:** Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха / Д. Е. Шашин, А. Д. Дьячков, А. Л. Романов, Н. Р. Костик, С. А. Тарасов, М. Е. Ильин, Н. В. Каманина // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 91–103.  
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-91-103

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры фотоники и кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) за проведение экспериментов по смачиванию, результаты которых представлены на рис. 4–7.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; принята к публикации после рецензирования 05.02.2026; опубликована онлайн 30.04.2026



## Synthesis, Characterization and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification

Dmitry E. Shashin<sup>1✉</sup>, Alexey D. Dyachkov<sup>1</sup>, Alexey L. Romanov<sup>1</sup>,  
Nikita R. Kostik<sup>2</sup>, Sergey A. Tarasov<sup>2</sup>, Matvey E. Ilyin<sup>2,3</sup>, Natalia V. Kamanina<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Gatchina, Russia

<sup>4</sup>Joint Stock Company "Research and Production Corporation n. a. S. I. Vavilov", St Petersburg, Russia

✉ ShashinDE@volgatech.net

### Abstract

**Introduction.** Intensive research is currently focused on identifying materials suitable for the development of advanced gas sensors and systems for water and air purification. Among the diversity of purification approaches, photocatalysis is viewed as a particularly promising method. Considering various potential materials, titanium dioxide stands out due to its physicochemical properties. Reactive magnetron sputtering is considered one of most effective techniques for titanium dioxide deposition.

**Aim.** To investigate the influence of synthesis parameters on the efficiency of a TiO<sub>2</sub>-based photocatalyst for its further application in water purification and gas sensing.

**Materials and methods.** Two series of five samples each were manufactured. In the first series, the sputtering duration was varied (3, 7, 10, 15, 30 min). In the second series, the argon-to-oxygen ratio in the reactive mixture was varied (90/10, 70/30, 50/50, 30/70, 10/90%). Subsequently, all samples in both series were irradiated for 2 h and then evaluated for hydrophilicity using an OSA 15 EC device.

**Results.** Two dependencies, i.e., the contact angle as a function of sputtering duration and the contact angle as a function of oxygen content in the reactive mixture, were established. The employed method was found to be suitable for depositing photocatalytic titanium dioxide films. Upon an increase in film thickness, the contact angle index varies within 37 and 45°. A 10-fold increase in sputtering duration (from 3 to 30 min) caused no significant differences in the photocatalytic and hydrophilic properties of the samples. It was experimentally established that the most photoactive films are synthesized at Ar/O<sub>2</sub> ratios of 90/10 and 10/90%.

**Conclusion.** The developed photocatalytic titanium dioxide film can be recommended for a number of water purification tasks and for use in gas sensors.

**Keywords:** thin films, titanium dioxide, magnetron sputtering, photocatalysis, hydrophilicity, wettability

**For citation:** Shashin D. E., Dyachkov A. D., Romanov A. L., Kostik N. R., Tarasov S. A., Ilyin M. E., Kamanina N. V. Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 91–103.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-91-103

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgements.** The authors of this paper would like to express their gratitude to the staff of the Department of Photonics and Department of micro- and nanoelectronics at Saint Petersburg Electrotechnical University for conducting the wetting experiments, the results of which are presented in Fig. 4–7.

Submitted 13.10.2025; accepted 05.02.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** В настоящее время ведется интенсивный поиск и исследование сред, позволяющих создавать современные сенсорные устройства, а также отрабатываются подходы и

методы для эффективной работы таких сенсоров. Рассматриваются материалы для газовых сенсоров, например, в [1] изучены нанокристаллы ZnO, декорированные Ag, синтезиро-

ванные низкотемпературным сольвотермическим методом, и обосновано их применение для высокочувствительного газового датчика водорода  $H_2$ . В [2] авторы предложили гетероструктуру на основе системы  $SnO_2/ZnO$  для определения  $NO_2$ ; было установлено, что основная причина высоких характеристик тестируемого газа заключается в том, что оксиды  $SnO_2$  и  $ZnO$  образуют N–N-гетеропереходы, которые значительно повышают электрическое сопротивление разрабатываемого датчика по сравнению с чистыми  $SnO_2$  и  $ZnO$ . В данном ключе применяются и полимерные материалы. Так в [3] были выполнены работы по синтезу газового сенсора на основе полимера полианилина для обнаружения газообразного аммиака.

Кроме газовых сенсоров интенсивно развиваются технологии очистки воды от различного рода загрязнений – как природных, так и связанных с жизнедеятельностью человека. В [4] представлены последние достижения в области применения фотокаталитической очистки сточных вод. Внимание авторов было сосредоточено на стратегиях повышения производительности этого метода; обсуждались проблемы и перспективы в такой многообещающей области; приведены данные о фотокаталитической активности материалов на основе серебра, диоксида титана, гетероструктур, содержащих оксиды вольфрама, циркония, а также оксид графена. Сделаны выводы о возможности разработки недорогих и высокоэффективных фотокатализаторов для очистки воды.

Таким образом, на сегодняшний день актуален и своевременно поставлен вопрос очистки воды и воздуха, что занимает важное место в жизни человека, ввиду того, что их загрязнение приводит к серьезным экологическим проблемам и влияет на здоровье населения. Учитывая растущее количество и сложность промышленных выбросов, а также недостаточную эффективность обычных методов очистки, существует острая необходимость в технологиях для улучшения фильтрации как сточных вод, содержащих различные загрязняющие вещества, так и воздуха, имеющего в составе множество опасных для человека летучих соединений [7].

Заметим, что среди различных методов очистки воздуха и воды именно фотокатализ

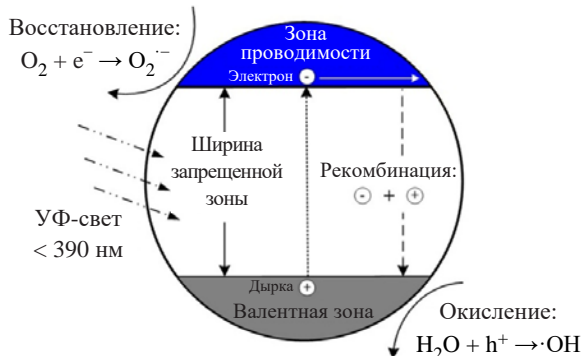


Рис. 1. Схематическое изображение механизма фотокатализа диоксида титана под действием падающего света

Fig. 1. Schematic representation of the photocatalytic mechanism of titanium dioxide under the action of incident light

занимает перспективное место. Данный эффект основан на генерации высокорективных радикалов на фотокатализаторе под воздействием подходящего источника света. На рис. 1 показан физический принцип данного эффекта [8].

На роль фотокатализатора, благодаря своим свойствам, хорошо подходит диоксид титана ( $TiO_2$ ). Его применение достаточно широко. К примеру, в [5] описана гетероструктура  $TiO_2NTs/rGO$ , используемая для повышения чувствительности к газу  $NO_2$ . Эти улучшения объясняются увеличением удельной поверхности, более высокой концентрацией хемосорбируемых форм кислорода и образованием  $p$ – $n$ -гетеропереходов между  $TiO_2$  и  $rGO$  в нанокompозитах. Это исследование дает ценную информацию для разработки газовых сенсоров на основе системы  $TiO_2$ /графен для обнаружения окисляющих газов даже при комнатной температуре. Фотокаталитические свойства диоксида титана также полезны и применяются во многих областях, таких, как медицина, экология, пищевая промышленность, строительство и др. [9]. Фотоиндуцированный фотокатализ пленок  $TiO_2$  может стать основой легко очищаемых поверхностей, самоочищающихся окон, антизапотеваяющих стекол, самостерилизующихся и антибактериальных плиток или фотокаталитических устройств для очистки воздуха и воды [10]. При УФ-облучении  $TiO_2$  может разлагать такие органические вещества, как красители, фенол, нефть и другие загрязнители [11].

Естественно, на современном этапе существуют многообразные технологии формирования фотокаталитических пленок  $TiO_2$ , однако

магнетронное распыление получило наибольшее распространение за счет возможности гибкого влияния на технологические параметры и, как следствие, на повышение выходных фотокаталитических свойств  $\text{TiO}_2$ . Наибольшее влияние на фотокаталитические свойства оказывают такие параметры, как соотношение аргона к кислороду в газовой смеси и время напыления покрытия [12]. Данные параметры могут сильно повлиять на кристаллическую структуру пленок. Так, увеличение в газовой смеси кислорода приводит к тому, что пленка становится более аморфной, и наоборот: при увеличении аргона – более кристаллической [13]. Изменение времени напыления подложки ухудшает оптические свойства пленок, влияя на их пропускание в видимом диапазоне [14].

Изучение влияния данных параметров технологического процесса на свойства пленок является важной задачей в вопросе получения эффективных фотокатализаторов. В связи с этим целью описываемой работы было изучение влияния параметров метода синтеза на варьирование эффективности фотокатализатора на основе  $\text{TiO}_2$ . Для исследования данного вопроса было сформировано две серии пленок. Варьировалось время напыления и соотношение аргона и кислорода в реактивной смеси. В качестве одного из методов контроля выступало измерение краевого угла смачивания воды на поверхности пленки  $\text{TiO}_2$ . Заметим, что смачиваемость поверхности, действительно, является одним из показателей изменения свойств материалов, что используется и при работе с оксидами титана; например, в [6] состав  $\text{TiO}_2$ -вода с массовой долей наночастиц оксида титана в диапазоне  $\sim 0.001 \dots 0.1$  % позволял варьировать теплопередачу и число осаждаемых наночастиц, что влияло на супергидрофобные свойства медных поверхностей.

**Методы получения и исследования пленок.** Осаждение тонкого слоя фотокатализатора часто осуществляется золь-гель-методом или химическим осаждением паров, однако можно использовать и метод физического осаждения паров, например магнетронное распыление. Магнетронное распыление – это плазменный процесс тонкослойного осаждения, используемый для получения широкого спек-

тра металлических и керамических покрытий. Он воспроизводим, хорошо масштабируется и обеспечивает превосходный контроль над химическими и морфологическими свойствами осажденных материалов. Магнетронное распыление – промышленно востребованный метод для получения фотокаталитических покрытий, поскольку позволяет надежно контролировать такие параметры, как кристалличность, состав и толщина, применимо для нескольких типов фотокатализаторов и обеспечивает хорошую адгезию. Для получения экспериментальных образцов использовалось реактивное магнетронное распыление, которое отличается тем, что помимо инертного газа (аргона) в камеру также подается реактивный газ (кислород).

В данном исследовании серии тонких пленок  $\text{TiO}_2$  формировались на модернизированной под магнетронное распыление вакуумной установке УВН-71ПЗ. Высокий вакуум в камере достигался с помощью последовательно включенных форвакуумного и паромасляного насосов. Схема установки показана на рис. 2 [15].

Установка предназначена для разработки и экспериментального исследования процессов получения пленок различных материалов в научно-исследовательских и учебных целях. Система работает в диапазоне измерения показаний давления без изменения предела измерений от 60 до  $10^{-6}$  Па. Магнетронные блоки питания работают в импульсном режиме, имеют

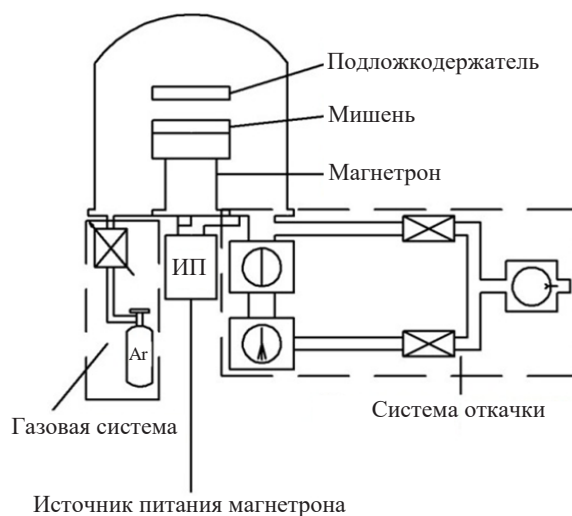


Рис. 2. Схема установки магнетронного распыления УВН-71ПЗ  
Fig. 2. Diagram of the UVN-71P3 magnetron sputtering system

комплексную защиту от короткого замыкания и систему гашения микродуг.

Для формирования экспериментальных серий пленок  $\text{TiO}_2$  используется кислород и аргон чистотой 99.9 %. В качестве подложек берется стекло с размерами  $60 \times 48 \times 2$  мм.

Процесс нанесения пленок оксида проходит в следующих условиях. Для серии подложек с изменением соотношения аргона к кислороду: а) давление  $\text{Ar}$  в камере – от 90 до 10 %; б) давление  $\text{O}_2$  в камере – от 10 до 90 %; в) рабочее давление – 1 Па; г) ток магнетрона – 1 А; д) температура нагрева подложек – 200 °С; е) время осаждения – 10 мин. Для серии подложек с изменением времени напыления: а) давление  $\text{Ar}$  в камере – 70 %; б) давление  $\text{O}_2$  в камере – 30 %; в) рабочее давление – 1 Па; г) ток магнетрона – 1 А; д) температура нагрева подложек – 200 °С; е) время осаждения – 3, 7, 10, 15 и 30 мин. На рис. 3 представлена схема процесса напыления пленок диоксида титана.

Фотокаталитические свойства пленок исследовались методом измерения краевого угла смачивания капли дистиллированной воды на поверхности пленки диоксида титана посредством устройства ОСА 15 ЕС.

ОСА 15 ЕС представляет собой прибор для измерения краевого угла смачивания и анализа контура капли с последующим определением полярной и дисперсионной составляющих поверхностной энергии исследуемого материала методом ОWRК (Owens–Wendt–Rabel–Kaelble – Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьелбле) [16], если это необходимо для конкретной технической задачи.

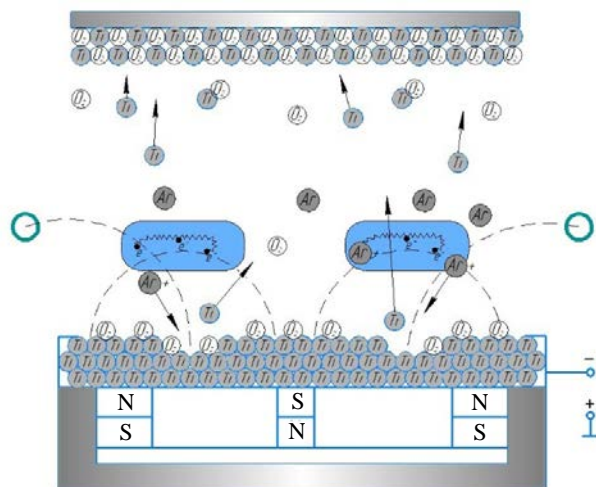


Рис. 3. Схема процесса напыления пленок диоксида титана

Fig. 3. Diagram of the titanium dioxide film sputtering process

Данное устройство позволяет измерять (и отображать найденные значения на экране) краевой угол смачивания на ровных, выпуклых и вогнутых поверхностях, а также пользоваться банком данных различных веществ для всех методов расчета при сравнении с литературными ссылками.

Засветка образцов производилась при помощи УФ-излучателя, состоящего из двух УФ-ламп мощностью 15 В, установленного на опоре с регулируемой высотой. Образцы с варьируемым временем напыления были размещены под УФ-излучателем, расположенным на расстоянии 10 см от середины источника излучения (середина толщины колбы светильника). Засветка производилась в течение 1 ч, после чего к ним были добавлены образцы с варьируемым соотношением  $\text{Ar}/\text{O}_2$ . Спустя час после размещения второй серии образцов образцы первой серии были убраны из-под воздействия УФ-излучателя, а оставшиеся образцы облучались в течение еще 1 ч.

**Результаты исследования.** На рис. 4 и 5 представлены замеры краевого угла смачивания для образцов, полученных с варьированием времени напыления до и после облучения УФ.

Как видно из рис. 4, тонкие пленки диоксида титана не обладают какой-либо гидрофильностью до облучения УФ, а даже наоборот, скорее гидрофобны, как и стеклянная подложка, на которую они нанесены. В то же время, стоит отметить, что облучение в УФ-области вызывает проявление тенденции смены гидрофобности на гидрофильность: угол смачивания изменяется от  $\sim 80 \dots 90^\circ$  до  $\sim 35 \dots 40^\circ$ , т. е. в  $\sim 2$  раза (рис. 5).

В табл. 1 представлены сводные данные по измерению краевого угла смачивания образцов

Табл. 1. Данные по измерению угла смачивания для первой серии пленок

Tab. 1. Measurement data on contact angle for the first series of films

Краевой угол смачивания ( $\theta$ ), ...°	Время напыления ( $t_{\text{нап}}$ ), мин				
	3	7	10	15	30
	44.3	37.35	34.2	48.95	40.1
	35.75	32.65	39.9	41.7	44.0
	41.35	34.45	39.7	44.3	46.0
	32.2	37.8	36.35	48.1	39.55
	31.9	38.55	36.15	43.0	31.4
Среднее значение	37.7	36.16	37.26	45.21	40.21

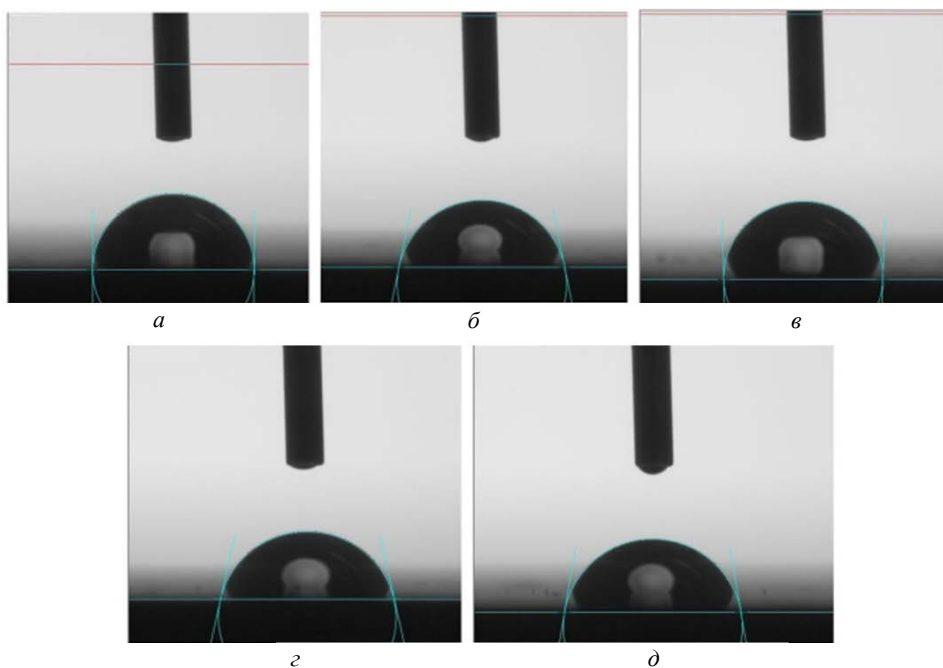


Рис. 4. Серия пленок с варьированием времени напыления до облучения УФ, мин:  
 $a - 3; б - 7; в - 10; г - 15; д - 30$

Fig. 4. Series of films with varying deposition duration prior to UV irradiation, min:  
 $a - 3; б - 7; в - 10; г - 15; д - 30$

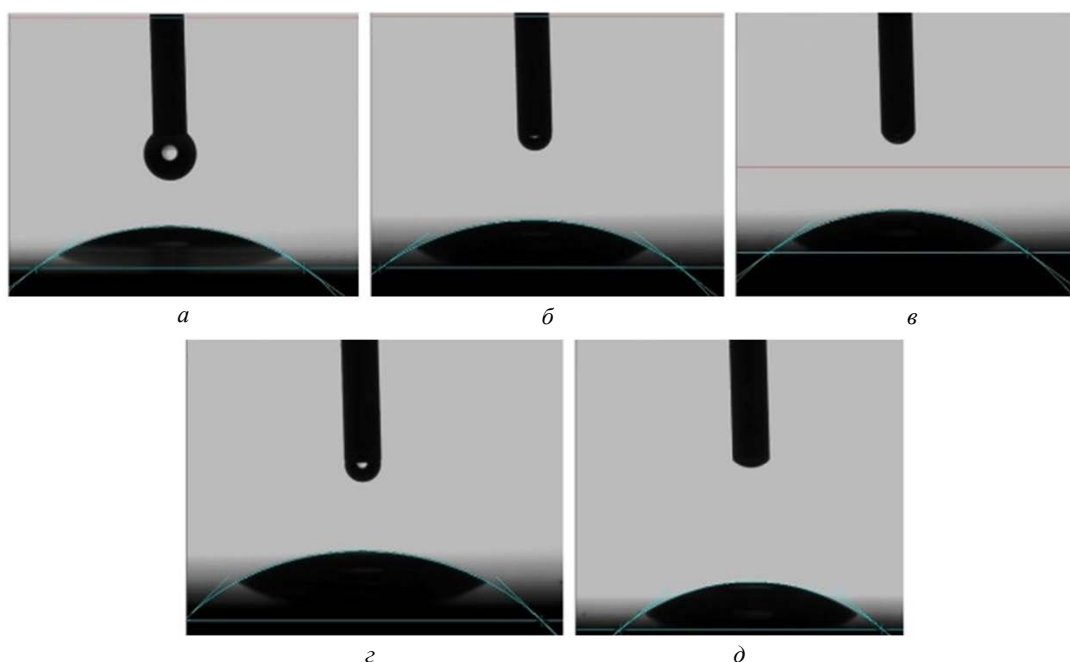


Рис. 5. Серия пленок с варьированием времени напыления после облучения УФ, мин:  
 $a - 3; б - 7; в - 10; г - 15; д - 30$

Fig. 5. Series of films with varying deposition duration after UV irradiation, min:  
 $a - 3; б - 7; в - 10; г - 15; д - 30$

данной серии пленок. Измерения проводились пятикратно, и подсчитывалось среднее значение.

На рис. 6 и 7 представлены изображения с измеренным углом смачивания для образцов, полученных с варьированием состава реактив-

ной смеси до и после облучения, как и в случае с предыдущей серией.

Как и в случае с первой серией, на рис. 6 наблюдается гидрофобность пленок непосредственно перед облучением, но, как видно по по-

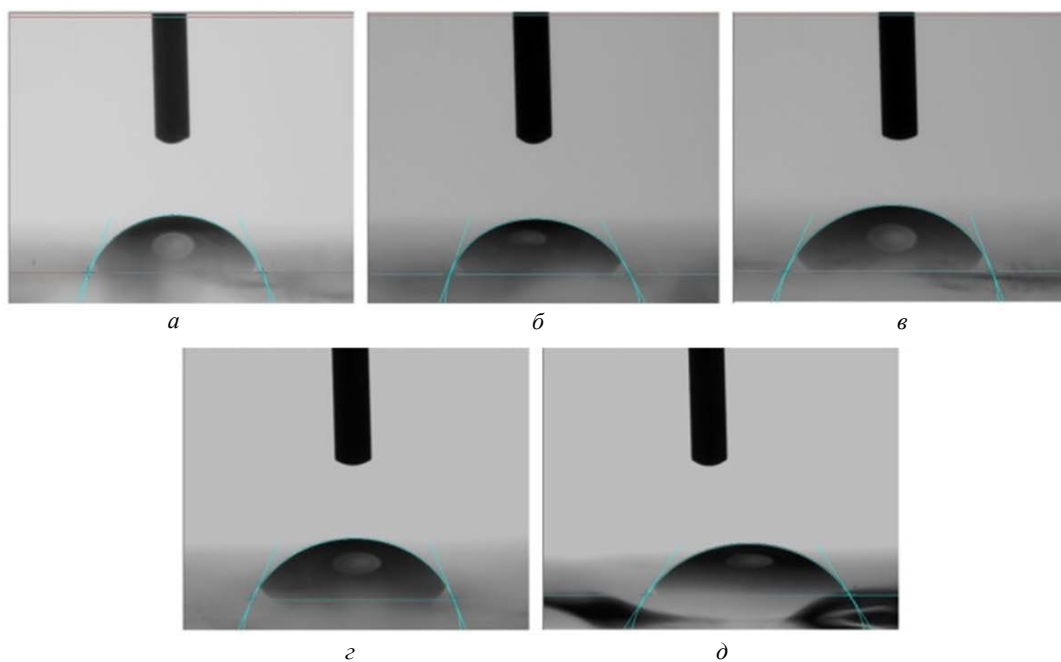


Рис. 6. Серия пленок с варьированием соотношения Ar/O<sub>2</sub> до облучения УФ, %:  
а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

Fig. 6. Series of films with varying Ar/O<sub>2</sub> ratio prior to UV irradiation, %:  
а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

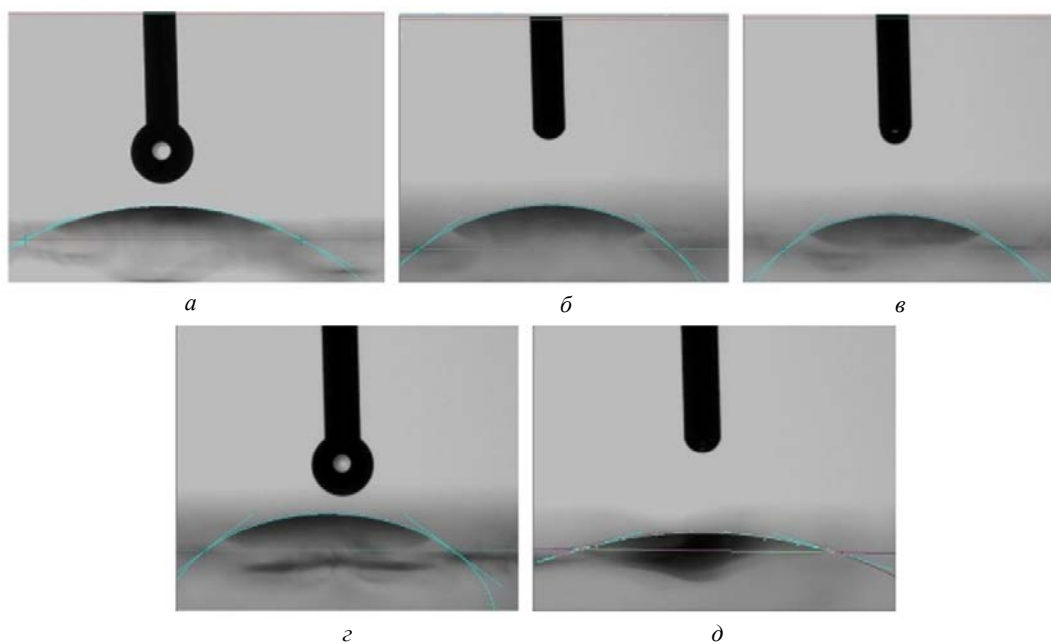


Рис. 7. Серия пленок с варьированием соотношения Ar/O<sub>2</sub> после облучения УФ, %:  
а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

Fig. 7. Series of films with varying Ar/O<sub>2</sub> ratio after UV irradiation, %:  
а – 90/10; б – 70/30; в – 50/50; г – 30/70; д – 10/90

следнему образцу (рис. 6, д), увеличение кислорода улучшает гидрофильные свойства покрытий.

В табл. 2 представлены сводные данные по измерению краевого угла смачивания образцов данной серии пленок. Измерения проводились

**Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана, а также их применение в области очистки воды и воздуха**  
**Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification**

пятикратно, и подсчитывалось среднее значение.

Изображения серий подложек до и после облучения УФ-лампой показывают, прежде всего, возможность использования полученных пленок диоксида титана в качестве фотокатализатора.

Табл. 2. Данные по измерению угла смачивания для второй серии пленок

Tab. 2. Measurement data on contact angle for the second series of films

Краевой угол смачивания ( $\theta$ ), ...°	Соотношение аргона к кислороду, %				
	90/10	70/30	50/50	30/70	10/90
	28.0	36.6	32.05	40.7	21.4
	27.5	32.2	37.9	42.65	16.0
	27.6	39.8	39.95	36.5	16.1
	27.7	46.0	38.8	26.5	12.3
	25.65	43.2	31.95	31.65	21.3
Среднее значение	27.29	39.56	36.13	35.6	17.42

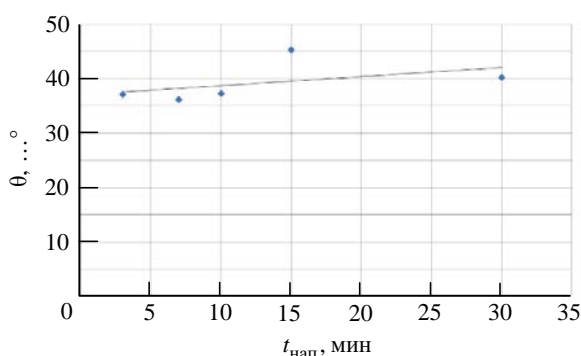


Рис. 8. Зависимость краевого угла смачивания от времени напыления

Fig. 8. Dependence of contact angle on sputtering duration

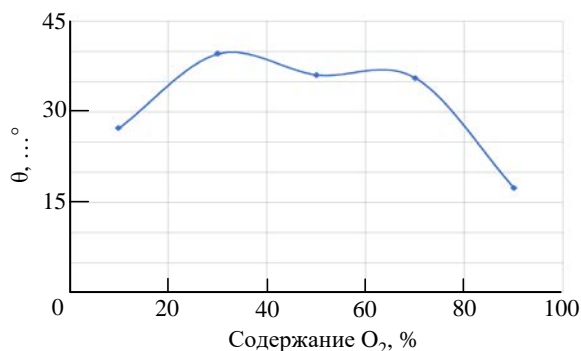


Рис. 9. Зависимость краевого угла смачивания от процента кислорода в смеси

Fig. 9. Dependence of contact angle on oxygen content in the mixture

На рис. 8 и 9 представлены зависимости краевого угла смачивания от исследуемых параметров, полученные при измерении после УФ-облучения.

Из графика на рис. 8 видно, что при увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Увеличение времени напыления в 10 раз (3 мин против 30 мин) не вызвало каких-то серьезных различий в фотокаталитических и гидрофильных свойствах двух данных образ-

цов, т. е. данный параметр не является значимым. Это соответствует данным, представленным в работе [17]. В ней отмечается, что гидрофильные свойства пленки не зависят от толщины, если она превышает 20 нм. Пленки толщиной меньше данного порога показывают изменение гидрофильности при изменении материала подложки.

Из графика на рис. 9 видно, что наиболее фотоактивные пленки можно синтезировать при соотношении Ar/O<sub>2</sub> 10/90 %. Данный результат согласуется с полученными ранее данными [18–20]. Как указано в [17], анатазные пленки можно получить при высоком содержании кислорода (более 50 %) и давлении от 0.7 до 2 Па. Следовательно, образец с самым высоким содержанием кислорода (рис. 9) содержит в составе больше анатаза и поэтому обладает лучшими фотокаталитическими свойствами.

**Заключение.** В ходе эксперимента по формированию фотокаталитических тонких пленок диоксида титана методом реактивного магнетронного распыления было получено две серии образцов с варьированием времени напыления и соотношения Ar/O<sub>2</sub> в реактивной смеси соответственно. С помощью прибора ОСА 15 ЕС измерялся краевой угол смачивания образцов (см. рис. 4–7), значения которого представлены в табл. 1 и 2.

Для двух серий образцов были получены зависимости краевого угла смачивания от варьируемых параметров. Данные графики представлены на рис. 8 и 9.

По зависимости угла смачивания от времени напыления можно сделать вывод, что существенное изменение времени напыления не приводит к каким-либо серьезным вариациям значения угла. При увеличении толщины пленки показатель краевого угла смачивания колеблется в пределах от 37 до 45°. Это означает, что данный параметр не является значимым.

На графике для второй серии образцов (с варьированием соотношения аргона к кислороду в смеси) наименьшее значение угла смачивания наблюдается для образцов, полученных с содержанием кислорода в реактивной смеси равным 90 %. Это показывает, что при данных условиях содержание анатаза в образцах значительно выше, чем в образцах, полученных с большим содержанием аргона.

Анализируя результаты описанной работы следует отметить, что, естественно, для расширения получаемых знаний о материалах при использовании приборного парка стоит применять и другие методы исследования, кроме прибора

ОСА 15 ЕС. Однако уже на данном этапе вполне возможно рекомендовать разработанную фотокаталитическую пленку диоксида титана для решения ряда задач по очистке воды и применения в качестве газовых сенсоров.

#### Авторский вклад

**Шашин Дмитрий Евгеньевич** – постановка серии опытов по формированию пленок оксида титана.

**Дьячков Алексей Дмитриевич** – проведение технологического процесса формирования фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Романов Алексей Леонидович** – проведение технологического процесса формирования фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Костик Никита Русланович** – проведение опытов по смачиваемости поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Тарасов Сергей Анатольевич** – постановка серии опытов по исследованию угла смачиваемости исследуемых образцов; обработка результатов.

**Ильин Матвей Евгеньевич** – проведение опытов по смачиваемости поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана.

**Каманина Наталия Владимировна** – анализ; физическое обоснование и формулирование результатов проведенного исследования.

#### Author's contribution

**Dmitry E. Shashin**, organisation of experiments, interpretation of data obtained, and editing of the article.

**Alexey D. Dyachkov**, conducting experiments on the formation of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Alexey L. Romanov**, conducting experiments on the formation of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Nikita R. Kostik**, conducting experiments on the wettability of the surface of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Sergey A. Tarasov**, setting up a series of experiments to study the wetting angle of the samples under study, interpreting of the results, editing of the article.

**Matvey E. Ilyin**, conducting experiments on the wettability of the surface of photocatalytic thin films of titanium dioxide.

**Natalia V. Kamanina**, interpreting the data obtained and editing the article.

#### Список литературы

1. Ag decorated ZnO nanocrystallines synthesized by a low-temperature solvothermal method and their application for high response H<sub>2</sub> gas sensor / Z. Li, G. Zhang, W. Gao, R. Zhao, Y. Wang // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. Vol. 30, № 20. P. 18959–18969.

doi: 10.1007/s10854-019-02253-5

2. Sputtered SnO<sub>2</sub>/ZnO heterostructures for improved NO<sub>2</sub> gas sensing properties / B. Sharma, A. Sharma, M. Joshi, J.-H. Myung // Chemosensors. 2020. Vol. 8, № 3. Art. № 67.

doi: 10.3390/chemosensors8030067

3. Synthesis of polyaniline (printable nanoink) gas sensor for the detection of ammonia gas / P. Dipak, D. C. Tiwari, A. Samadhiya, N. Kumar, T. Biswajit, P. A. Singh, R. K. Tiwari // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2020. Vol. 31. P. 22512–22521.

doi: 10.1007/s10854-020-04760-2

4. Recent advances of photocatalytic application in water treatment: A review / G. Ren, H. Han, Y. Wang, S. Liu, J. Zhao, X. Meng, Z. Li // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 7. Art. № 1804.

doi: 10.3390/nano11071804

5. Improving the NO<sub>2</sub> gas sensing performances at room temperature based on TiO<sub>2</sub> NTs/rGO heterojunction nanocomposites / Y. Ling, Y. Yu, C. Tian, C. Zou // Nanomaterials. 2024. Vol. 14, № 22. Art. № 1844.

doi: 10.3390/nano14221844

6. Effect of surface wettability on nanoparticle deposition during pool boiling on laser-textured copper surfaces / J. Berce, A. Hadžić, M. Može, K. Arhar, H. Gjerkeš, M. Zupancic, I. Golobic // Nanomaterials. 2024. Vol. 14, № 3. Art. № 311.

doi: 10.3390/nano14030311

7. Photocatalysis / R. Ameta, M. S. Solanki, S. Benjamin, S. C. Ameta // Advanced oxidation processes for wastewater treatment. New York: Academic Press, 2018. P. 135–175.

doi: 10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1

8. A review on the pathways of the improved structural characteristics and photocatalytic performance of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) thin films fabricated by the magnetron-sputtering technique / Y.-H. Wang, K. H. Rahman, C.-C. Wu, K.-C. Chen // Catalysts. 2020. Vol. 10, № 6. Art. № 598.

doi: 10.3390/catal10060598

9. Amorphous TiO<sub>2</sub> nanostructures: synthesis, fundamental properties and photocatalytic applications / S. Sun, P. Song, J. Cui, S. Liang // *Catalysis Science & Technology*. 2019. Vol. 9, № 16. P. 4198–4215. doi: 10.1039/C9CY01020C
10. Cost comparison of advanced oxidation processes for wastewater treatment using accumulated oxygen-equivalent criteria / E. Mousset, W. H. Loh, W. S. Lim, L. Jarry, Z. Wang, O. Lefebvre // *Water Research*. 2021. Vol. 200. Art. № 117234. doi: 10.1016/j.watres.2021.117234
11. Bactericidal mode of titanium dioxide photocatalysis / Z. Huang, P.-C. Maness, D. M. Blake, E. J. Wolfrum, S. L. Smolinski, W. A. Jacoby // *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2000. Vol. 130, № 2–3. P. 163–170. doi: 10.1016/S1010-6030(99)00205-1
12. Effect of deposition parameters on properties of TiO<sub>2</sub> films deposited by reactive magnetron sputtering / B. Wang, S. Wei, L. Guo, Y. Wang, Y. Liang, B. Xu, F. Pan, A. Tang, X. Chen // *Ceramics Intern.* 2017. Vol. 43, № 14. P. 10991–10998. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.139
13. Sirghi L., Hatanaka Y. Hydrophilicity of amorphous TiO<sub>2</sub> ultra-thin films // *Surface Science*. 2003. Vol. 530, № 3. P. L323–L327. doi: 10.1016/S0039-6028(03)00397-2
14. Martinez A. I., Acosta D. R., Lopez A. A. Effect of deposition methods on the properties of photocatalytic TiO<sub>2</sub> thin films prepared by spray pyrolysis and magnetron sputtering // *J. of Physics: Condensed Matter*. 2004. Vol. 16, № 22. P. S2335–S2344. doi: 10.1088/0953-8984/16/22/036
15. Shashin D. E., Sushentsov N. I. Development of manufacturing technology of photodielectric sensitive element of ultraviolet range on the basis of thin films of zinc oxide // *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2019. № 6. С. 99–109. doi: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109
16. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // *J. of Applied Polymer Science*. 1969. Vol. 13, № 8. P. 1741–1747. doi: 10.1002/app.1969.070130815
17. Шаповалов В. И. Нанопорошки и пленки оксида титана для фотокатализа (обзор) // *Физика и химия стекла*. 2010. Т. 36, № 2. С. 145–194.
18. Шашин Д. Е., Дьячков А. Д. Формирование фотокаталитических пленок TiO<sub>2</sub> методом реактивного магнетронного распыления с применением квазизамкнутого пространства // *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2024. № 3 (148). С. 75–90.
19. Особенности получения фотокаталитических тонких пленок TiO<sub>2</sub> методом магнетронного распыления / Н. И. Сушенцов, Д. Е. Шашин, Е. В. Михеева, А. Д. Дьячков // *Вакуумная техника и технологии 2022: тр. 29-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2022. С. 282–285.*
20. Дьячков А. Д., Шашин Д. Е., Романов А. Л. Исследование морфологии поверхности фотокаталитических тонких пленок диоксида титана // *Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Междунар. науч. конф., Донецк, 15–17 окт. 2024. Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. С. 95–97.*

### Информация об авторах

**Шашин Дмитрий Евгеньевич** – кандидат технических наук (2020), доцент (2024), заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; фотокатализ; самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: ShashinDE@volgatech.net  
<https://orcid.org/0000-0002-8222-2824>

**Дьячков Алексей Дмитриевич** – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2023, Поволжский государственный технологический университет), аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; фотокатализ.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: addyachkov@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-6286-8330>

**Романов Алексей Леонидович** – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2024, Поволжский государственный технологический университет), заведующий лабораторией кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Поволжского государственного технологического университета. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; тонкопленочные структуры.

Адрес: Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: romanov.tan2014@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0007-9981-511X>

**Костик Никита Русланович** – кандидат технических наук (2024), доцент кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина).

Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – возобновляемая энергетика; технико-экономический анализ методов повышения эффективности гибридных систем ВИЭ; фотовольтаика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: nrkostik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

**Тарасов Сергей Анатольевич** – доктор технических наук (2016), заведующий кафедрой фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – электроника; фотоника; солнечная энергетика; физика и оптика полупроводников; светоизлучающие и фоточувствительные приборы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: satarasov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>

**Ильин Матвей Евгеньевич** – бакалавр по направлению "Фотоника и оптоинформатика" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), магистрант кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Лаборант-исследователь Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – нанотехнологии; фотоника; жидкие кристаллы; фуллерены и др. наночастицы; взаимодействие лазерного излучения с веществом; граница раздела; покрытия.

Адрес: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", мкр. Орлова роща, д. 1, Гатчина, 188300, Россия

E-mail: ilin\_matwei@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>

**Каманина Наталия Владимировна** – доктор физико-математических наук (2001), начальник отдела "Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств" АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова" (Санкт-Петербург), профессор (2001) кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Гатчина). Автор более 340 научных работ. Сфера научных интересов: фотофизика; нанотехнологии; наночастицы и нанотрубки; полимеры; жидкие кристаллы; покрытия; взаимодействие излучения с веществом.

Адрес: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", мкр. Орлова роща, д. 1, Гатчина, 188300, Россия

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

## References

1. Li Z., Zhang G., Gao W., Zhao R., Wang Y. Ag Decorated ZnO Nanocrystallines Synthesized by a Low-Temperature Solvothermal Method and Their Application for High Response H<sub>2</sub> Gas Sensor. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019, vol. 30, no. 20, pp. 18959–18969. doi: 10.1007/s10854-019-02253-5
2. Sharma B., Sharma A., Joshi M., Myung J.-H. Sputtered SnO<sub>2</sub>/ZnO Heterostructures for Improved NO<sub>2</sub> Gas Sensing Properties. *Chemosensors*. 2020, vol. 8, no. 3, art. no. 67. doi: 10.3390/chemosensors8030067
3. Dipak P., Tiwari D. C., Samadhiya A., Kumar N., Biswajit T., Singh P. A., Tiwari R. K. Synthesis of Poly-aniline (Printable Nanoink) Gas Sensor for the Detection of Ammonia Gas. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, pp. 22512–22521. doi: 10.1007/s10854-020-04760-2
4. Ren G., Han H., Wang Y., Liu S., Zhao J., Meng X., Li Z. Recent Advances of Photocatalytic Ap-  
plication in Water Treatment: A Review. *Nanomaterials*. 2021, vol. 11, no. 7, art. no. 1804. doi: 10.3390/nano11071804
5. Ling Y., Yu Y., Tian C., Zou C. Improving the NO<sub>2</sub> Gas Sensing Performances at Room Temperature Based on TiO<sub>2</sub> NTs/rGO Heterojunction Nanocomposites. *Nanomaterials*. 2024, vol. 14, no. 22, art. no. 1844. doi: 10.3390/nano14221844
6. Berce J., Hadžić A., Može M., Arhar K., Gjerkeš H., Zupancić M., Golobic I. Effect of Surface Wettability on Nanoparticle Deposition During Pool Boiling on Laser-Textured Copper Surfaces. *Nanomaterials*. 2024, vol. 14, no. 3, art. no. 311. doi: 10.3390/nano14030311
7. Ameta R., Solanki M. S., Benjamin S., Ameta S. C. Photocatalysis: Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. New York, Academic Press, 2018, pp. 135–175. doi: 10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1
8. Wang Y.-H., Rahman K. H., Wu C.-C., Chen K.-C. A Review on the Pathways of the Improved Structural

**Формирование и исследование фотокаталитических пленок диоксида титана,**

**а также их применение в области очистки воды и воздуха**

**Synthesis, Characterization, and Application of Photocatalytic Titanium Dioxide Films for Water and Air Purification**

Characteristics and Photocatalytic Performance of Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Thin Films Fabricated by the Magnetron-Sputtering Technique. *Catalysts*. 2020, vol. 10, no. 6, art. no. 598.  
doi: 10.3390/catal10060598

9. Sun S., Song P., Cui J., Liang S. Amorphous TiO<sub>2</sub> Nanostructures: Synthesis, Fundamental Properties and Photocatalytic Applications. *Catalysis Science & Technology*. 2019, vol. 9, no. 16, pp. 4198–4215.  
doi: 10.1039/C9CY01020C

10. Mousset E., Loh W. H., Lim W. S., Jarry L., Wang Z., Lefebvre O. Cost Comparison of Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment Using Accumulated Oxygen-Equivalent Criteria. *Water Research*. 2021, vol. 200, art. no. 117234.  
doi: 10.1016/j.watres.2021.117234

11. Huang Z., Maness P.-C., Blake D. M., Wolfrum E. J., Smolinski S. L., Jacoby W. A. Bactericidal Mode of Titanium Dioxide Photocatalysis. *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2000, vol. 130, no. 2–3, pp. 163–170.  
doi: 10.1016/S1010-6030(99)00205-1

12. Wang B., Wei S., Guo L., Wang Y., Liang Y., Xu B., Pan F., Tang A., Chen X. Effect of Deposition Parameters on Properties of TiO<sub>2</sub> Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *Ceramics Intern*. 2017, vol. 43, no. 14, pp. 10991–10998.  
doi: 10.1016/j.ceramint.2017.05.139

13. Sirghi L., Hatanaka Y. Hydrophilicity of Amorphous TiO<sub>2</sub> Ultra-Thin Films. *Surface Science*. 2003, vol. 530, no. 3, pp. L323–L327.  
doi: 10.1016/S0039-6028(03)00397-2

14. Martinez A. I., Acosta D. R., Lopez A. A. Effect of Deposition Methods on the Properties Of Photocatalytic TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis and Magnetron Sputtering. *J. of Physics: Condensed Matter*. 2004, vol. 16, no. 22, pp. S2335–S2344.  
doi: 10.1088/0953-8984/16/22/036

15. Shashin D. E., Sushentsov N. I. Development of Manufacturing Technology of Photodielectric Sensitive Element of Ultraviolet Range on the Basis of Thin Films of Zinc Oxide. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*. 2019, no. 6, pp. 99–109.  
doi: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109

16. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers. *J. of Applied Polymer Science*. 1969, vol. 13, no. 8, pp. 1741–1747.  
doi: 10.1002/app.1969.070130815

17. Shapovalov V. I. Nanopowders and Films of Titanium Oxide for Photocatalysis: A Review. *Glass Physics and Chemistry*. 2010, vol. 36, no. 2, pp. 121–157.  
doi: 10.1134/S108765961002001X

18. Shashin D. E., Dyachkov A. D. TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Film Formation by Reactive Magnetron Sputtering Using the Quasi-Closed Space. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument Engineering*. 2024, vol. 148, no. 3, pp. 75–90. (In Russ.)

19. Sushentsov N. I., Shashin D. E., Mikheeva E. V., Dyachkov A. D. *Osobennosti polucheniya fotokataliticheskikh tonkikh plenok TiO<sub>2</sub> metodom magnetronnogo raspyleniya* [Features of Obtaining Photocatalytic Thin Films of TiO<sub>2</sub> by Magnetron Sputtering]. 29<sup>th</sup> All-Russ. Conf. with Intern. Participation. *Vacuum Technique and Technology – 2022*, St Petersburg, Russia, 21–23 June 2022. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2022, pp. 282–285. (In Russ.)

20. Dyachkov A. D., Shashin D. E., Romanov A. L. *Issledovanie morfologii poverkhnosti fotokataliticheskikh tonkikh plenok dioksida titana* [Study of the Surface Morphology of Photocatalytic Thin Films of Titanium Dioxide]. *Donetsk Readings 2024: Education, Science, Innovation, Culture and Contemporary Challenges: Proc. of the IX Intern. Scientific Conf.*, Donetsk, 15–17 Oct. 2024. Donetsk, *Izd-vo DonGU*, 2024, pp. 95–97. (In Russ.)

### Information about the authors

**Dmitry E. Shashin**, Cand. Sci. (2020), Associate Professor (2024), Head of the Department of Radio Equipment Design and Production Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola). The author of more than 90 publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; photocatalysis; and self-propagating high-temperature synthesis. Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia

E-mail: ShashinDE@volgatech.net  
<https://orcid.org/0000-0002-8222-2824>

**Alexey D. Dyachkov**, Master's degree in electronics and nanoelectronics (2023, Volga State University of Technology), Postgraduate student of the Department of Radio Equipment Design and Manufacturing of Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola). The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; photocatalysis.

Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia  
E-mail: addyachkov@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-6286-8330>

**Alexey L. Romanov**, Bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2024, Volga State University of Technology), Head of laboratory of the Department of Radio Equipment Design and Manufacturing of Volga State University of Technology. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; thin film structures.

Address: Volga State University of Technology, Lenin Square, Yoshkar-Ola 424000, Russia  
E-mail: romanov.tan2014@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-9981-511X>

**Nikita R. Kostik**, Cand. Sci. (2024), Associate Professor of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 10 scientific publications. Area of expertise: renewable energy; feasibility studies for improving the efficiency of hybrid renewable energy systems; and photovoltaics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
<https://orcid.org/0000-0002-5146-8549>

**Sergey A. Tarasov**, Dr Sci. (Eng.) (2016), Head of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: electronics; photonics; solarenergy; physics and optics of semiconductors; light-emitting and photosensitive devices. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: [satarasov@etu.ru](mailto:satarasov@etu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-6321-0019>;

**Matvey E. Ilyin**, Bachelor's degree in Photonics and Optoinformatics (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Master of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University. Laboratory researcher of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute". The author of 5 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology; photonics; liquid crystals; fullerenes; etc. nanoparticles; interaction of laser radiation with matter; interface, coatings. Address: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Orlova Roshcha microdistrict, 1, Gatchina 188300, Russia  
E-mail: [ilin\\_matwei@mail.ru](mailto:ilin_matwei@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4470-2779>

**Natalia V. Kamanina**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2001), Head of the Department of Photophysics of nanostructured materials and devices of Joint Stock Company "Research and Production Corporation n. a. S. I. Vavilov", Professor (2001) of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University, Lead Researcher of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute". The author of 340 scientific publications. Area of expertise: photophysics; nanotechnology; nanoparticles and nanotubes; polymers; liquid crystals; coatings; interaction of radiation with matter. Address: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute", Orlova Roshcha microdistrict, 1, Gatchina 188300, Russia  
E-mail: [nvkamanina@mail.ru](mailto:nvkamanina@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

---