

Научная статья

УДК 539.23, 539.612

DOI: 10.18384/2949-5067-2025-4-6-16

АКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ПРОЗРАЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ОРГАНИЧЕСКОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

*Кононенко Н. Е., Симушкина С. В., Чекулаев И. С., Курилов А. Д.**

Государственный университет просвещения, г. Москва, Российская Федерация

**Корреспондирующий автор, e-mail: ad.kurilov@guppros.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2025

Принята к публикации 6.11.2025

Аннотация

Цель: разработка воспроизводимого и мягкого метода очистки и активации поверхности прозрачных проводящих электродов (ITO, FTO), который позволяет достичь высокой поверхностной энергии с сохранением морфологии и электрофизических свойств подложки для их последующего применения в органической оптоэлектронике.

Процедура и методы. Разработан новый протокол очистки на основе обработки поверхностей в аммиачно-перекисном растворе при кипячении и последующей активации в озоновой камере. Для оценки эффективности метода использовались измерения краевого угла смачивания с последующим расчётом поверхностной энергии, а также анализ морфологии поверхности и её электрофизических характеристик.

Результаты. Показано, что разработанный протокол позволяет достичь значений поверхностной энергии ~ 70 мДж/м², что свидетельствует о значительном увеличении гидрофильности и высокой степени очистки. Установлено, что метод не приводит к деградации проводящих слоёв, сохраняя их исходную морфологию и электропроводность, в отличие от традиционных подходов с использованием кислот.

Теоретическая и/или практическая значимость. Высокая поверхностная энергия, достигнутая с помощью обработки аммиачно-перекисным раствором, способствует улучшению адгезии и однородности нанесения органических слоёв, что критически важно для повышения эффективности и стабильности OLED, OPV и других гибридных устройств.

Ключевые слова: прозрачные проводящие оксиды, очистка поверхности, поверхностная энергия, активация поверхности, органическая оптоэлектроника, адгезия, смачиваемость

Благодарности и источники финансирования. Работа выполнена в рамках реализации научно-исследовательского проекта-победителя конкурса на получение гранта Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет просвещения» в 2025 году. Авторы также выражают благодарность педагогическому технопарку «Кванториум» имени И. В. Курчатова Государственного университета просвещения за предоставленную возможность использования оборудования, что оказалось крайне важным для проведения данного исследования.

Для цитирования:

Активация поверхности тонкоплёночных прозрачных электродов для применения в органической оптоэлектронике / Н. Е. Кононенко, С. В. Симушкина, И. С. Чекулаев, А. Д. Курилов // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2025. № 4. С. 6–16. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-4-6-16>

Original research article

SURFACE ACTIVATION OF THIN-FILM TRANSPARENT ELECTRODES FOR APPLICATION IN ORGANIC OPTOELECTRONICS

*N. Kononenko, S. Simushkina, I. Chekulaev, A. Kurilov**

Federal State University of Education, Moscow, Russian Federation

**Corresponding author, e-mail: ad.kurilov@guppros.ru*

Received by the editorial office 30.10.2025

Accepted for publication 6.11.2025

Abstract

Aim is to development of a reproducible and mild method for cleaning and activating the surface of transparent conductive electrodes (ITO, FTO) that enables high surface energy while preserving the substrate's morphology and electrophysical properties for their subsequent application in organic optoelectronics.

Methodology. A new cleaning protocol was developed based on treating surfaces in a boiling ammonia–peroxide solution followed by activation in an ozone chamber. To evaluate the method's effectiveness, contact angle measurements were performed followed by surface energy calculations, as well as analysis of surface morphology and its electrophysical characteristics.

Results. It is shown that the developed protocol enables achieving surface energy values of up to ~ 70 mJ/m², indicating a significant increase in hydrophilicity and a high degree of cleaning. It has been established that the method does not lead to degradation of the conductive layers, preserving their initial morphology and electrical conductivity, unlike traditional acid-based approaches.

Research implications. The high surface energy achieved through ammonia–peroxide solution treatment combined with ozone activation contributes to improved adhesion and uniformity of organic layer deposition, which is critically important for enhancing the efficiency and stability of OLEDs, OPVs, and other hybrid devices.

Keywords: transparent conductive oxides, surface cleaning, surface energy, organic optoelectronics, adhesion, wettability

Acknowledgments: This work was supported by the grant from the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Federal State University of Education” in 2025, awarded to the winning research project in the competitive grant program. We also extend our gratitude to the Pedagogical Technopark “Kvantorium” named after I. V. Kurchatov at the Federal State University of Education for providing access to their equipment, which was instrumental in conducting this study.

For citation:

Kononenko, N. E., Simushkina, S. V., Chekulaev, I. S. & Kurilov, A. D. (2025). Surface activation of thin-film transparent electrodes for application in organic optoelectronics. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 4, pp. 6–16. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-4-6-16>

Введение

Современная органическая оптоэлектроника, включающая такие устройства, как светоизлучающие диоды (OLED), фотодетекторы, солнечные элементы (OPV) и жидкокристаллические дисплеи (LCD), продолжает активно развиваться, воплощая перспективы создания гибких, лёгких и экономичных устройств [1]. Одним из ключевых факторов, определяющим эффективность и долговечность этих приборов, является качество нанесения активного органического слоя на прозрачный проводящий электрод.

В качестве проводящих слоёв наиболее широко используются оксиды индия-олова (ITO) [2–4] и оксид олова, допированный фтором (FTO) [5; 6]. Однако их поверхность часто характеризуется недостаточной смачиваемостью и низкой поверхностной энергией, что связано с наличием органических и адсорбированных углеродных загрязнений, полученных в процессе производства и хранения. Это приводит к плохой адгезии органических слоёв, неоднородности их нанесения, образованию дефектов и, как следствие, снижению эффективности устройства.

Для решения этой проблемы применяются различные методы активации и очистки поверхности [7], такие как озоновая обработка [8], кислородная плазма [9] и обработка в растворах кислот [10]. Несмотря на определённую эффективность, эти методы имеют ряд ограничений: использование кислотных реагентов чревато взаимодействием с электродами, что ведёт к изменению морфологии и шероховатости вплоть до образования дефектов в слое проводника [11]. Применение же стандартных протоколов с использованием различных органических растворителей (ацетон, изопропиловый спирт, толуол и т. д.) требует их высокой чистоты и продолжительного времени обработки.

В связи с этим разработка воспроизводимого метода очистки и активации поверхности ITO и FTO, при этом не изменяющего структуру проводников, является актуальной задачей. В данной работе мы предлагаем новый протокол, основанный на использовании аммиачно-перекисного раствора (АПР). Этот метод обладает значительным потенциалом благодаря своей эффективности и щадящему воздействию на поверхность проводящего оксида, что позволяет избежать её химической и структурной деградации. Целью нашей работы

является изучение влияния нового протокола очистки плёнок ITO и FTO на основе АПР на свободную энергию поверхности, а также на структурные и электрофизические свойства.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны коммерческие стёкла с ITO- (900, 350, 180 нм) и FTO-покрытием (190 нм). АПР был подготовлен из концентрированного раствора аммиака (25%), концентрированного раствора перекиси водорода (30%) и деионизированной воды в объёмном соотношении 1:1:5 соответственно.

Стёкла с нанесённым покрытием вносили в мыльный раствор и обрабатывали в течение 10 минут в ультразвуковой ванне. После обработки образцы промывали большим количеством деионизированной воды для удаления остаточных количеств поверхностно-активных веществ. Промытые подложки вносили в свежеприготовленный кипящий АПР и выдерживали в течение 15 минут. После обработки АПР образцы тщательно промывали деионизированной водой для удаления реакционной смеси и высушивали в токе сухого воздуха. Заключительной стадией подготовки являлась обработка подложек в озоновом очистителе (UV-Ozone Cleaner, Osilla) в течение 10 минут для удаления остаточных органических загрязнителей и дополнительной активации поверхности.

Смачиваемость очищенных поверхностей характеризовали путём измерения статического краевого угла смачивания с использованием трёх тестовых жидкостей: деионизированной воды, глицерина и этиленгликоля. Поверхностную энергию и её полярную и дисперсионную компоненты рассчитывали по методу OWRK (Owens-Wendt-Rabel-Kaelble) [12]:

$$\frac{\gamma_l (\cos\theta + 1)}{2\sqrt{\gamma_l^D}} = \sqrt{\gamma_s^P} \frac{\sqrt{\gamma_l^P}}{\sqrt{\gamma_l^D}} + \sqrt{\gamma_s^D}, \quad (1)$$

где γ_l^D и γ_l^P – дисперсионная и полярная составляющая полной энергии поверхностного натяжения жидкости, γ_s^D и γ_s^P – дисперсионная и полярная составляющая полной энергии поверхности исследуемой подложки, γ_l – полная энергия поверхностного натяжения, θ – краевой угол смачивания.

Для контроля влияния разработанного протокола на электрофизические свойства проводящих слоёв проведено измерение поверхностного сопротивления до и после обработки с помощью четырёхзондового метода (JG ST2258C, зонд ST2558B-F01 из медно-фосфорного сплава с золотым покрытием). Анализ морфологии поверхности проводился с использованием атомно-силового микроскопа (NT-MDT NEXT II, полуконтактный режим), размер сканируемых областей 5×5 мкм и 50×50 мкм.

Результаты и обсуждение

Первоочередной задачей исследования была оценка эффективности разработанного АПР-протокола по увеличению поверхностной энергии. Результаты измерения краевых углов смачивания и последующего расчёта по модели OWRK показывают высокую эффективность метода (см. рис. 1).

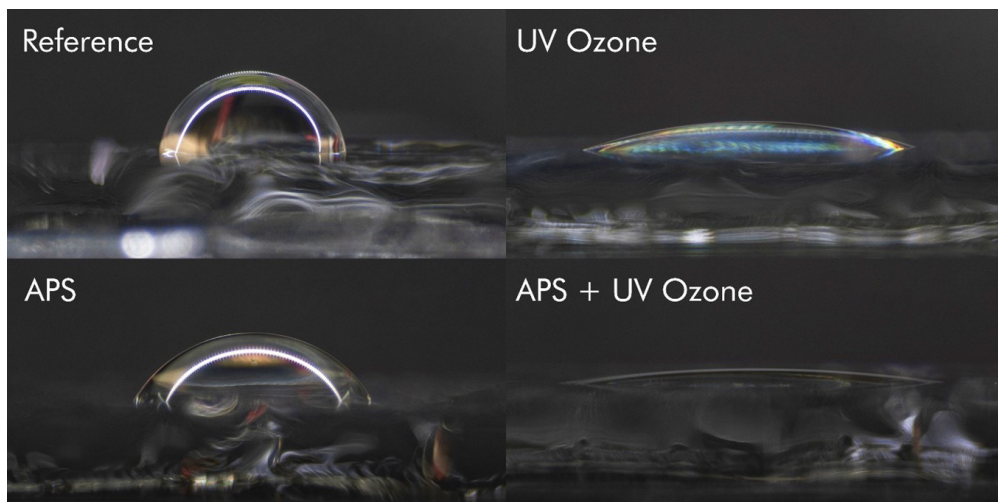


Рис. 1 / Fig. 1. Изменение смачиваемости поверхности ИТО (1 Ом/□) водой: до обработки (Reference), после очистки в АПР (APS), после очистки в растворителях и обработки озоном (UV Ozone) и после комбинированного метода обработки в АПР и УФ-озоном (APS+UV Ozone) / Change in the wettability of the ITO surface (1 Ohm/□) with water: before treatment (Reference), after cleaning in APS, after cleaning in solvents and treatment with ozone (UV Ozone) and after a combined method of treatment in APS and UV ozone (APS+UV Ozone).

Источник: подготовлено авторами

При обработке неочищенных подложек с прозрачными электродами (~ 17 – 25 мДж/м²) АПР наблюдается рост поверхностной энергии вдвое (до ~ 40 мДж/м²). Как видно из данных, представленных на рис. 1, обработка в АПР и последующая обработка УФ и озоном позволила достичь значения общей поверхностной энергии на уровне ~ 70 мДж/м² для обоих типов подложек (ИТО и FTO). Полученные данные сопоставимы с результатами измерения краевого угла смачивания и полной поверхностной энергии для подложек, очищенных стандартным методом с использованием органических растворителей (ацетон, изопропанол) (см. рис. 2).

Рост поверхностной энергии обусловлен, в первую очередь, значительным увеличением полярной компоненты. Это прямо указывает на то, что обработка в АПР приводит не просто к удалению органических загрязнений, но и к химической модификации поверхности за счёт увеличения числа гидроксильных групп (-ОН) на поверхности. Образование гидроксильных групп объясняет резкое повышение гидрофильности и энергии поверхности,

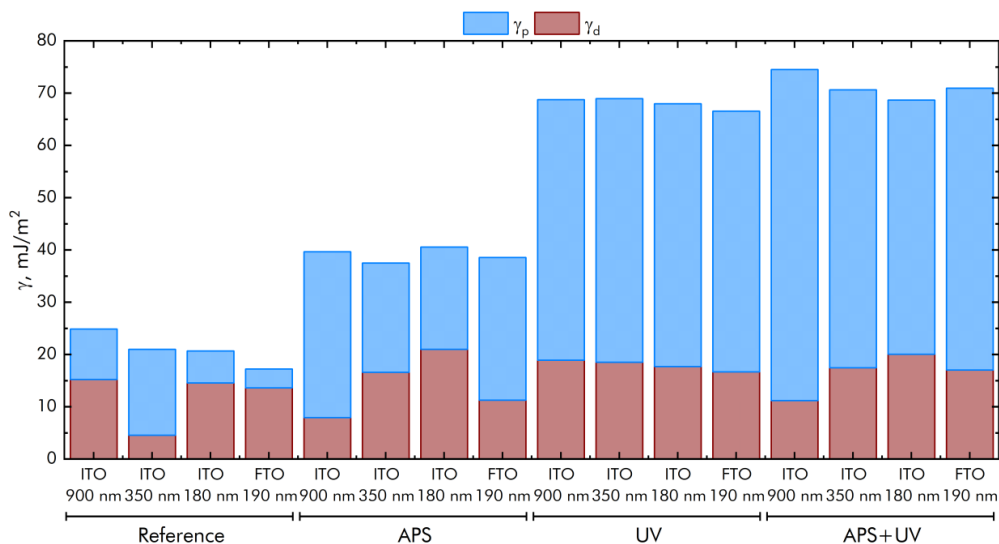


Рис. 2 / Fig. 2. Значения полной поверхностной энергии, дисперсионной (красный) и полярной (синий) составляющей энергии покрытий ITO и FTO после очистки / Total surface energy, dispersion (red) and polar (blue) components of energy of ITO and FTO coatings after cleaning

Источник: подготовлено авторами

что особенно важно для последующего однородного нанесения органических слоёв из полярных растворов.

Для подтверждения того, что разработанный метод не разрушает электродное покрытие, был проведён сравнительный анализ морфологии и поверхностного сопротивления подложек до и после обработки.

Данные атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 3) показывают, что морфологические особенности плёнок для поверхностей ITO и FTO остаются неизменными после АПР-обработки. В отличие от агрессивного кислотного травления, которое приводит к заметному увеличению шероховатости и образованию дефектов, наш протокол сохраняет исходную морфологию проводящего оксида. Таким образом, очистка происходит за счёт химического окисления загрязнений без заметного воздействия на саму подложку.

Результаты измерений удельного поверхностного сопротивления (рис. 4) также не показали статистически значимых изменений. Это свидетельствует о том, что АПР-обработка не вносит дефектов, влияющих на электропроводность плёнок, и не приводит к химическому окислению или восстановлению оксида, что является частым побочным эффектом других методов.

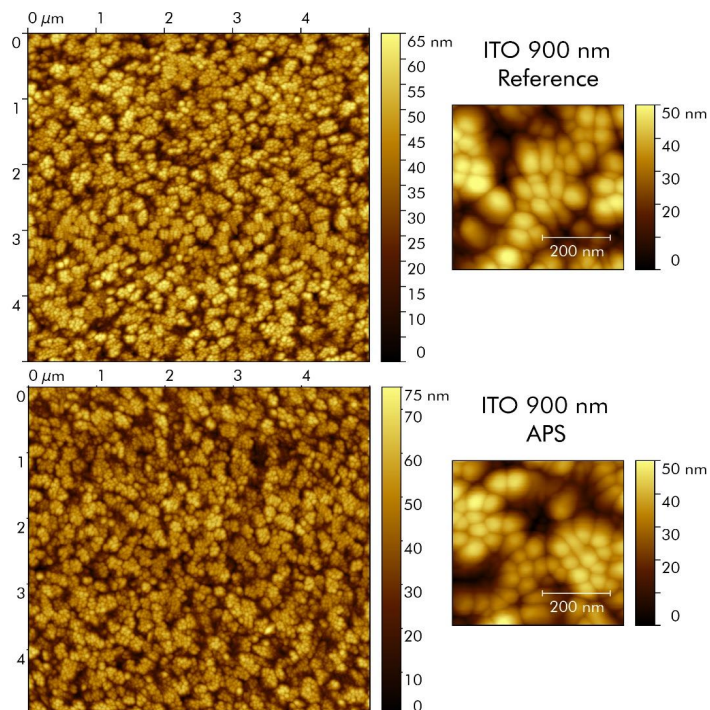


Рис. 3 / Fig. 3. АСМ-изображения поверхности ИТО (а) до и (б) после АПР-обработки / AFM images of ITO surface (a) before and (b) after APS processing

Источник: подготовлено авторами

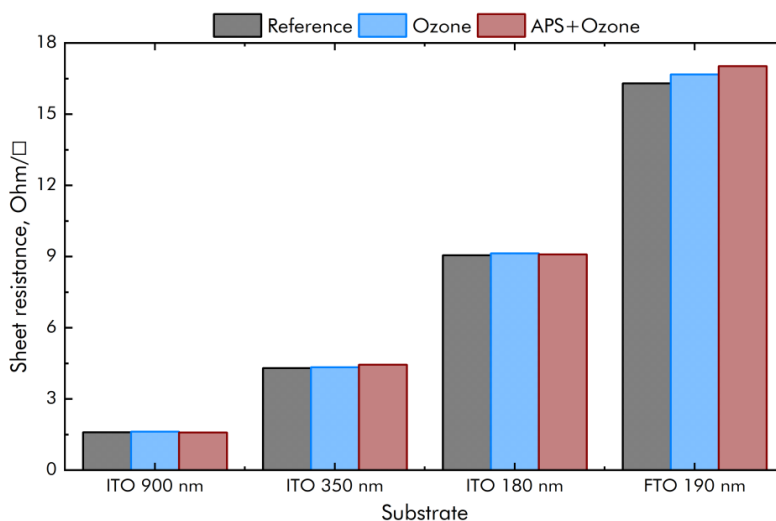


Рис. 4 / Fig. 4. Поверхностное сопротивление токопроводящих покрытий ИТО и FTO до и после обработки / Surface resistance of ITO and FTO conductive coatings before and after treatment

Источник: подготовлено авторами

Заключение

В данной работе был успешно разработан и исследован новый протокол очистки и активации поверхности прозрачных проводящих электродов (ITO и FTO) на основе аммиачно-перекисного раствора для применения в органической оптоэлектронике. Предложенный способ позволяет достичь значений поверхностной энергии до ~ 40 мДж/м² после обработки АПР и до ~ 70 мДж/м² после дополнительной активации озоном, что свидетельствует о формировании высокоактивной и гидрофильной поверхности. Рост энергии обусловлен, в первую очередь, увеличением полярной компоненты, что связано с эффективным удалением органических загрязнений и увеличением числа гидроксильных групп на поверхности плёнок.

Ключевым преимуществом предложенного метода является его щадящее воздействие. Показано, что обработка в АПР не приводит к значимым изменениям морфологии и её удельного поверхностного сопротивления. Это отличает его от агрессивных методов, таких как кислотное травление.

Предложенный метод является простым, воспроизводимым, не требует использования сложного оборудования и большого количества растворителей высокой чистоты и может быть легко интегрирован в стандартные технологические процессы. Обеспечивая высокое качество поверхности без её повреждения, АПР-очистка создаёт идеальные условия для нанесения последующих органических слоёв, что является критически важным для повышения эффективности и стабильности продукции при производстве OLED- и OPV-устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Enhanced current efficiency in top-emitting organic light-emitting diodes using a novel Mg:Ag/Ag Cathode Structure / D. N. Chausov, A. D. Kurilov, N. S. Parashchuk, A. V. Nuriev, A. A. Morozov, A. D. Bozhko, V. S. Zhurkin, A. V. Kazak, S. A. Stakharniy // Applied Surface Science. 2025. Vol. 711. Article no. 163954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.163954.
2. Fabrication of dye-sensitized solar cells based on push-pull asymmetrical substituted zinc and copper phthalocyanines and reduced graphene oxide nanosheets / F. Chindeka, P. Mashazi, J. Britton, D. O. Oluwole, S. Mapukata, T. Nyokong // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2020. Vol. 399. Article no. 112612. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2020.112612.
3. ITO Electrode with a Tunable Work Function for Organic Photovoltaic Devices / Jinjin Yang, Hui Li, Jianming Yang, Bin Sun, Qinye Bao, Zheng Tang, Zaifei Ma // ACS Applied Electronic Materials. 2022. Vol. 4. Iss. 8. P. 4104–4112. DOI: 10.1021/acsaelm.2c00720.
4. Criteria for ITO (indium-tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode / Y.-H. Tak, K.-B. Kim, H.-G. Park, K.-H. Lee, J.-R. Lee // Thin Solid Films. 2002. Vol. 411. Iss. 1. P. 12–16. DOI: 10.1016/S0040-6090(02)00165-7.

5. Organic photovoltaic devices based on polythiophene films electrodeposited on FTO substrates / R. Valaski, C. D. Canestraro, L. Micaroni, R. M. Q. Mello, L. S. Roman // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007. Vol. 91. Iss. 8. P. 684–688. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.12.005.
6. Transparent conducting thin films of fluoro doped tin oxide (FTO) deposited using inkjet printing technique / W. Z. Samad, M. M. Salleh, A. Shafiee, M. A. Yarmo // *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2010)*. 2010. P. 52–55. DOI: 10.1109/SMELEC.2010.5549462.
7. Dependence of indium-tin-oxide work function on surface cleaning method as studied by ultraviolet and x-ray photoemission spectroscopies / K. Sugiyama, H. Ishii, Y. Ouchi, K. Seki // *Journal of Applied Physics*. 2000. Vol. 87. Iss. 1. P. 295–298. DOI: 10.1063/1.371859.
8. Effect of UV-ozone treatment on ITO and post-annealing on the performance of organic solar cells / T. Hu, F. Zhang, Zh. Xu, S. Zhao, X. Yue, G. Yuan // *Synthetic Metals*. 2009. Vol. 159. Iss. 7-8. P. 754–756. DOI: 10.1016/j.synthmet.2008.11.024.
9. Interplay of cleaning and de-doping in oxygen plasma treated high work function indium tin oxide (ITO) / I. Irfan, S. Graber, F. So, Y. Gao // *Organic Electronics*. 2012. Vol. 13. Iss. 10. P. 2028–2034. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.05.036.
10. The relation between the electrical, chemical, and morphological properties of indium-tin oxide layers and double-layer light-emitting diode performance / P. Vacca, M. Petrosino, A. Guerra, R. Chierchia, C. Minarini, D. D. Sala, A. Rubino // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. Vol. 111. Iss. 46. P. 17404–17408. DOI: 10.1021/jp0744376.
11. Thermal and chemical treatment of ITO substrates for improvement of OLED performance / T. P. Nguyen, P. Le Rendu, N. N. Dinh, M. Fourmigué, C. Mézière // *Synthetic Metals*. 2003. Vol. 138. Iss. 1-2. P. 229–232. DOI: 10.1016/S0379-6779(02)01292-4.
12. Surface energy for electroluminescent polymers and indium-tin-oxide / Z. Zhong, S. Yin, C. Liu, Y. Zhong, W. Zhang, D. Shi, C. Wang, // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 207. Iss. 1–4. P. 183–189. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)01328-4.

REFERENCES

1. Chausov, D. N., Kurilov, A. D., Parashchuk, N. S., Nuriev, A. V., Morozov, A. A., Bozhko, A. D., Zhurkin, V. S., Kazak, A. V. & Stakharniy, S. A. (2025). Enhanced current efficiency in top-emitting organic light-emitting diodes using a novel Mg:Ag/Ag Cathode Structure. In: *Applied Surface Science*, 711, 163954. DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.163954.
2. Chindeka, F., Mashazi, P., Britton, J., Oluwole, D. O., Mapukata, S. & Nyokong, T. (2020). Fabrication of dye-sensitized solar cells based on push-pull asymmetrical substituted zinc and copper phthalocyanines and reduced graphene oxide nanosheets. In: *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 399, 112612. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2020.112612.

3. Jinjin, Yang, Hui, Li, Jianming, Yang, Bin, Sun, Qinye, Bao, Zheng, Tang & Zaifei, Ma (2022). ITO Electrode with a Tunable Work Function for Organic Photovoltaic Devices. In: *ACS Applied Electronic Materials*, 4 (8), 4104–4112. DOI: 10.1021/acsaelm.2c00720.
4. Tak, Y.-H., Kim, K.-B., Park, H.-G., Lee, K.-H. & Lee, J.-R. (2002). Criteria for ITO (indium-tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode. In: *Thin Solid Films*, 411 (1), 12–16. DOI: 10.1016/S0040-6090(02)00165-7.
5. Valaski, R., Canestraro, C. D., Micaroni, L., Mello, R. M. Q. & Roman, L. S. (2007). Organic photovoltaic devices based on polythiophene films electrodeposited on FTO substrates. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 (8), 684–688. DOI: 10.1016/j.solmat.2006.12.005.
6. Samad, W. Z., Salleh, M. M., Shafiee, A. & Yarmo, M. A. (2010). Transparent conducting thin films of fluoro doped tin oxide (FTO) deposited using inkjet printing technique. In: *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2010)*, 52–55. DOI: 10.1109/SMELEC.2010.5549462.
7. Sugiyama, K., Ishii, H., Ouchi, Y. & Seki, K. (2000). Dependence of indium-tin-oxide work function on surface cleaning method as studied by ultraviolet and x-ray photoemission spectroscopies. In: *Journal of Applied Physics*, 87 (1), 295–298. DOI: 10.1063/1.371859.
8. Hu, T., Zhang, F., Xu, Z., Zhao, S., Yue, X. & Yuan, G. (2009). Effect of UV-ozone treatment on ITO and post-annealing on the performance of organic solar cells. In: *Synthetic Metals*, 159 (7-8), 754–756. DOI: 10.1016/j.synthmet.2008.11.024.
9. Irfan, I., Graber, S., So, F. & Gao, Y. (2012). Interplay of cleaning and de-doping in oxygen plasma treated high work function indium tin oxide (ITO). In: *Organic Electronics*, 13 (10), 2028–2034. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.05.036.
10. Vacca, P., Petrosino, M., Guerra, A., Chierchia, R., Minarini, C., Sala, D. D. & Rubino, A. (2007). The relation between the electrical, chemical, and morphological properties of indium-tin oxide layers and double-layer light-emitting diode performance. In: *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (46), 17404–17408. DOI: 10.1021/jp0744376.
11. Nguyen, T. P., Le Rendu, P., Dinh, N. N., Fourmigué, M. & Meziere, C. (2003). Thermal and chemical treatment of ITO substrates for improvement of OLED performance. In: *Synthetic Metals*, 138 (1-2), 229–232. DOI: 10.1016/S0379-6779(02)01292-4.
12. Zhong, Z., Yin, S., Liu, C., Zhong, Y., Zhang, W., Shi, D. & Wang, C. (2003). Surface energy for electroluminescent polymers and indium-tin-oxide. In: *Applied Surface Science*, 207 (1-4), 183–189. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)01328-4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кононенко Никита Евгеньевич (г. Москва) – техник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;

<https://orcid.org/0009-0005-4860-1707>; e-mail: kononenkonick2708@gmail.com

Симушкина Софья Владимировна (г. Москва) – студент физико-математического факультета Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0009-0002-1529-6310>; e-mail: simushkinasofa@gmail.com

Чекулаев Игорь Сергеевич (г. Москва) – младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5876>; e-mail: chekulaev.i.s@yandex.ru

Курилов Александр Дмитриевич (г. Москва) – кандидат физико-математических наук, заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0000-0001-8915-2411>; e-mail: ad.kurilov@guppros.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita E. Kononenko (Moscow) – Technician, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0009-0005-4860-1707>; e-mail: kononenkonick2708@gmail.com

Sofya V. Simushkina (Moscow) – Student, Faculty of Physics and Mathematics, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0009-0002-1529-6310>; e-mail: simushkinasofa@gmail.com

Igor S. Chekulaev (Moscow) – Junior Researcher, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0000-0002-6636-5876>; e-mail: chekulaev.i.s@yandex.ru

Aleksandr D. Kurilov (Moscow) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0000-0001-8915-2411>; e-mail: ad.kurilov@guppros.ru