

Модификация прозрачного проводящего ITO-покрытия наночастицами шунгита

Л. О. Федорова^{1,2}, Н. В. Каманина^{1,2,3}✉

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

³ АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия
✉ nvkamanina@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование спектральных, электрических и механических свойств ITO-покрытия, модифицированного наночастицами шунгита, с целью определения его потенциальной применимости в электронике в качестве прозрачного проводящего покрытия. Шунгит осаждался на поверхность проводящего слоя с применением бесконтактного лазерного метода при варьировании напряженности электрического поля от 100 до 600 В/см. По результатам исследования структурирование ITO-покрытий наночастицами шунгита приводит к значительному увеличению как микротвердости поверхности, так и сопротивления, а также к сдвигу спектра пропускания в видимом диапазоне в сторону больших длин волн и увеличению пропускания в ИК-диапазоне.

Ключевые слова: ITO-покрытие, прозрачные проводящие покрытия, шунгит, углеродные нанотрубки, жидкие кристаллы, лазерный метод осаждения, поверхностная электромагнитная волна, микротвердость, спектр

Для цитирования: Федорова Л. О., Каманина Н. В. Модификация прозрачного проводящего ITO-покрытия наночастицами шунгита // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 1. С. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-5-12.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Modification of a Transparent Conductive ITO Coating with Shungite Nanoparticles

L. O. Fedorova^{1,2}, N. V. Kamanina^{1,2,3}✉

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Petersburg Nuclear Institute Physics of National Research Center «Kurchatov Insitute», Gatchina, Russia

³ JSC «Research and Production Corporation S. I. Vavilova, Saint Petersburg, Russia
✉ nvkamanina@mail.ru

Abstract. The spectral, electrical, and mechanical properties of an ITO coating modified with shungite nanoparticles were studied in order to determine the potential applicability of such coatings in electronics as transparent conductive coating layers. Shungite was deposited on the surface of the conductive layer using a non-

contact laser method by varying the electric field strength from 100 to 600 V/cm. According to the results of the study obtained, the structuring modification of ITO coatings with shungite nanoparticles leads to a significant increase in both surface hardness and resistance, as well as to a shift in the transmission spectrum in the visible range towards longer wavelengths and an increase in transmission in the IR range.

Keywords: ITO coating, transparent conductive coatings, shungite, carbon nanotubes, liquid crystals, laser deposition method, surface electromagnetic wave, microhardness, spectrum

For citation: Fedorova L. O., Kamanina N. V. Modification of a Transparent Conductive ITO Coating with Shungite Nanoparticles // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 1. P. 5–12. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-5-12.

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

Введение. Прозрачные проводящие покрытия (ППП) – одни из ключевых элементов различных оптико-электронных приборов, поскольку такие материалы обладают одновременно высокими электрической проводимостью и прозрачностью в видимом диапазоне спектра, зачастую вплоть до ближнего ИК-диапазона. Такие покрытия широко используются в солнечных элементах в качестве антиотражающих покрытий [1], применяются как управляющие контакты в электро- и свето-адресуемых модуляторах и электрооптических жидкокристаллических (ЖК) ячейках [2]–[4], а также востребованы в качестве электродов в прозрачных транзисторах [5]. К типичным материалам PPP относятся оксиды металлов с большими значениями ширины запрещенной зоны, легированные подходящим количеством доноров носителей заряда для улучшения свойств.

Прозрачные проводящие пленки не относятся ни к полностью прозрачным, ни к проводящим, как металлы. С точки зрения зонной теории, комбинация этих двух свойства противоречива. Полностью прозрачные материалы – это диэлектрики с заполненными валентными зонами и пустыми зонами проводимости. Прозрачность в видимом диапазоне определяется шириной запрещенной зоны более 3 эВ. Металлическая проводимость возникает, когда уровень Ферми находится в зоне с высокой плотностью состояний, обеспечивающей высокую концентрацию носителей заряда.

Однако такая комбинация может быть достигнута, например, в оксидах индия (In_2O_3), олова (SnO_2) и цинка (ZnO). В нелегированном состоянии это диэлектрики. Для того чтобы сдвинуть уровень Ферми в сторону зоны проводимости, необходимо их сильно легировать, что позволяет увеличить концентрацию носителей заряда.

Среди PPP наиболее популярен оксид индия-олова (indium-tin oxide, ITO) с 90 % In_2O_3 и 10 % SnO_2 , обладающий наилучшими значениями проводимости и пропускания в сравнении с другими материалами (ZnO , AZO). Важные ограничения использования ITO заключаются в высоком значении коэффициента преломления n и уменьшающемся запасе индия в земной коре. Один из способов улучшения свойств таких покрытий – их модификация наночастицами – фуллеренами или углеродными нанотрубками (УНТ).

С развитием нанотехнологий постепенно осознается важность поиска природных материалов, способных заменить искусственные, синтезируемые в лабораториях. Примером такого материала может служить шунгит, который нетоксичен, легко добывается из Земли, имеет собственный дипольный момент и может заменить широко распространенные углеродные нанотрубки.

Заонежский район республики Карелия – это крупнейшее месторождение шунгитовых пород [6], но не единственное. Подобные месторождения были обнаружены в Красноярском крае, Казахстане [7] и Китае [8]. Шунгиты имеют широкий спектр применения: металлургия, строительство, медицина, экология, химическая промышленность и другие отрасли [9], [10].

Шунгит представляет собой комбинацию большого количества элементов, а именно [11]: SiO_2 (57.0 %), C (30.0 %), Al_2O_3 (4.0 %), crystal water (1.7 %), K_2O (1.5 %), Fe_2O_3 (1.49 %), S (1.2 %), MgO (1.2 %), FeO (0.6 %), CaO (0.3 %), Na_2O (0.2 %), TiO_2 (0.2 %), MnO (0.15 %). Тот факт, что шунгит представляет собой экологически безопасный фуллереносодержащий материал с относительно низкой стоимостью, делает его конкурентом других наноматериалов. Синтезированные фуллерены обладают весьма высокой стои-

мостью (от 100 до 900 долларов за грамм) из-за сложности технологического процесса их очистки. Однако низкий процент фуллеренов в шунгите служит ограничивающим фактором для извлечения природных фуллеренов. Схематично шунгитный нанокompозит представлен на рис. 1.

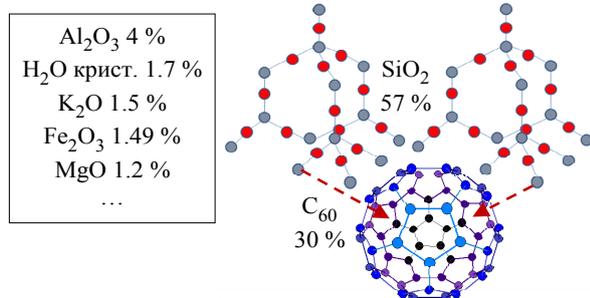


Рис. 1. Схематичное представление шунгита
Fig. 1. Schematic representation of shungite

На данный момент большинство проведенных исследований шунгита было направлено на изучение его антибактериальных свойств, а также его способности очищать воду и воздух от загрязнений. Небольшое количество исследований шунгита и композитных материалов на его основе связано с тем, что он относится к относительно редкоземельным и неизвестен в большинстве стран.

Постановка задачи. В данной статье показаны и проанализированы результаты исследований гетероструктуры ИТО, модифицированной наночастицами карельского шунгита. Ее цель – определить, является ли ИТО-покрытие, модифицированное наночастицами шунгита, применимым для создания жидкокристаллических (ЖК) электрооптических пространственно-временных модуляторов света, ЖК-ячеек или солнечных элементов. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи. Для исследования изменения свойств прозрачности проводились измерения спектров пропускания в видимом и ИК-диапазонах. Для определения изменения механических свойств, которые определяют стабильность и долговечность работы устройства на основе исследуемого материала, осуществлялись измерения параметров микротвердости. Метод атомно-силовой микроскопии применялся для анализа шероховатости поверхности. Проводились также измерения сопротивления образцов для исследования изменения свойств проводимости.

Экспериментальные условия. Для модификации структуры ИТО применялась система лазерного осаждения, которая включает в себя вакуумный пост УВР-2 (УВР-4), токопроводящую сетку для управления энергией осаждаемых частиц и CO₂-лазер на длине волны 10.6 мкм с мощ-

ностью 30 Вт и диаметром пучка 5 мм. В качестве источника материала пленок использовался порошок «Ceras Inc.» оксидов индия и олова (90 и 10 % по массе соответственно, чистота 99.99 %). Покрытия, толщина которых находилась в диапазоне от 80 до 120 нм, наносились на стеклянные подложки крон К-8 толщиной 3 мм.

Проводилось также дополнительное ориентирование частиц электрическим полем, напряженность которого варьировалась от 0 (выключенное состояние) до 600 В/см. Данный метод запатентован и показан в [12]. Преимущества описанного метода осаждения заключаются в возможности управления электрическим полем скоростью потока частиц, а также последовательного нанесения пленок и наночастиц на их поверхность. Дополнительно осуществлялась обработка, рельефа ИТО + шунгит поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ), что способствовало лучшей укладке ЖК-молекул в собираемых ЖК-ячейках.

Спектральные свойства исследовались с применением спектрофотометра СФ-26 с диапазоном 200...1100 нм и Фурье-спектрометра «FSM-1202», работающем в диапазоне 1...2.5 мкм. Измерения микротвердости проводились с помощью прибора «ПМТ-3М». Принцип работы микротвердомера основан на вдавлении алмазного наконечника в исследуемый материал под определенной нагрузкой и измерении линейного значения диагонали полученного отпечатка. Перемещения предметного столика прибора проводились в двух взаимно перпендикулярных направлениях от 0 до 10 мм, нагрузка варьировалась от 1 до 5 г. Значение микротвердости определялось путем деления нормальной нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка. Измерение параметров рельефа поверхности осуществлялось контактным методом атомно-силовой микроскопии (Solver Next NT-MDT) при частоте сканирования 1 Гц и областью сканирования 30 × 30 мкм.

Для сравнения представлены результаты следующих образцов: образцы с чистым покрытием ИТО, образцы ИТО с обработкой ПЭВ, образцы ИТО с обработкой ПЭВ, структурированные наночастицами шунгита при напряженности поля 100 и 600 В/см.

Результаты и обсуждение. Результаты измерения спектров пропускания в видимом и ИК-диапазонах представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Приведены данные по пропусканию чистого проводящего покрытия, а также обработанного поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) и шунгитом.

На рис. 2 показано, что при добавлении наночастиц шунгита возникают осцилляции спектра пропускания из-за изменения рельефа поверхности и его толщины. Процесс абляции, связанный с обработкой ПЭВ, приводит как к уменьшению толщины образцов, так и созданию рельефа поверхности.

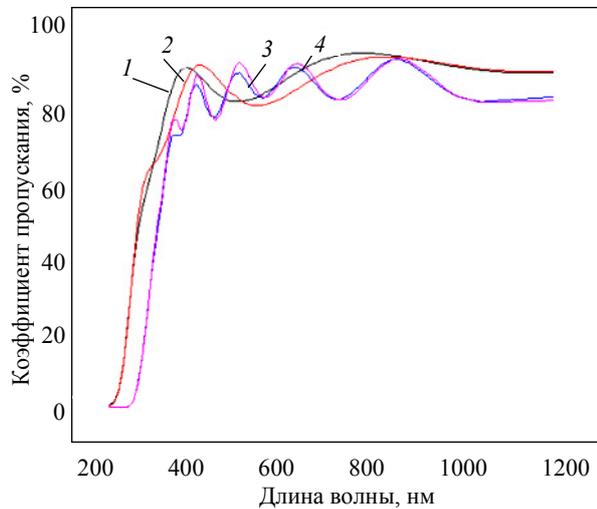


Рис. 2. Изменение пропускания ИТО в видимом диапазоне после нанесения наночастиц шунгита: 1 – чистый ИТО; 2 – ИТО, обработанный поверхностной электрической волной; 3 – ИТО с шунгитом, нанесенным при напряженности электрического поля 100 В/см; 4 – ИТО с шунгитом, нанесенным при напряженности электрического поля 600 В/см

Fig. 2. Change in ITO transmittance in the visible range after deposition of shungite nanoparticles: 1 – pure ITO; 2 – ITO treated with surface electric wave; 3 – ITO with shungite deposited at an electric field strength of 100 V/cm; 4 – ITO with shungite deposited at an electric field strength of 600 V/cm

Добавление в структуру шунгита способствует сдвигу коэффициента пропускания в сторону ИК-диапазона на 40 нм, а сдвиг спектра должен соответствовать изменению значения ширины запрещенной зоны:

$$E_g(\text{ИТО чистый}) = \frac{1.24 \cdot 10^3}{\lambda_b(\text{ИТО чистый})} = 3.86 \text{ эВ};$$

$$E_g(\text{ИТО+шунгит}) = \frac{1.24 \cdot 10^3}{\lambda_b(\text{ИТО+шунгит})} = 3.44 \text{ эВ},$$

где λ_b – граница оптического поглощения, нм; $\lambda_b(\text{ИТО чистый}) = 320$ нм; $\lambda_b(\text{ИТО + шунгит}) = 360$ нм. С химической точки зрения сдвиг спектра на 40 нм соответствует изменению подвижности носителей заряда на порядок. На рис. 3 наблюдается существенное изменение пропускания в ИК-диапазоне покрытий ИТО при добавлении шунгита, где представлен только один график спектра пропускания для ИТО+шунгит, так как образцы, по-

лученные при 100 и 600 В/см, обладают практически идентичными спектральными кривыми. В перспективе вполне реально спрогнозировать и показать функционирование, скажем, жидкокристаллической ячейки при использовании ориентанта в качестве структуры: ИТО + ПЭВ + шунгит.

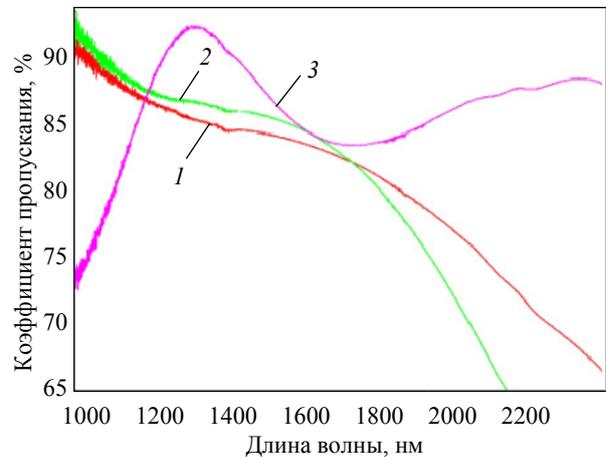


Рис. 3. Изменение пропускания ИТО в ИК-диапазоне после нанесения наночастиц шунгита:

1 – чистый ИТО; 2 – ИТО, обработанный поверхностной электрической волной; 3 – ИТО с шунгитом, нанесенным при напряженности электрического поля 600 В/см

Fig. 3. Change in ITO transmittance in the IR range after deposition of shungite nanoparticles: 1 – pure ITO; 2 – ITO treated with surface electric wave; 3 – ITO with shungite deposited at an electric field strength of 600 V/cm

Напомним, что в исследовании измерялась механическая прочность (тестировалась микротвердость) тонких пленок. Минимальная нагрузка составляла 0.5 г, при этом значении индентор не оставлял следов на поверхности образцов, максимальная нагрузка составляла 5 г. На рис. 4 показаны изображения поверхностей образцов с отпечатками алмазного наконечника при проведении измерений микротвердости.

В таблице представлены результаты исследований – показано увеличение микротвердости (k_1) и сопротивления (k_2) покрытий ИТО, структурированных УНТ и шунгитом. Видно, что значение микротвердости системы ИТО + шунгит гораздо больше по сравнению с системой ИТО + УНТ, что может быть связано с увеличением плотности упаковки атомов структуры и высокими значениями модуля Юнга наночастиц, входящих в состав порошка шунгита [13].

Стоит заметить, что структурирование ИТО шунгитом позволяет повысить механическую прочность проводящих контактов, поэтому определяет возможность использования промежуточных слоев ИТО в лазерных системах преобразования оптической информации, где используются

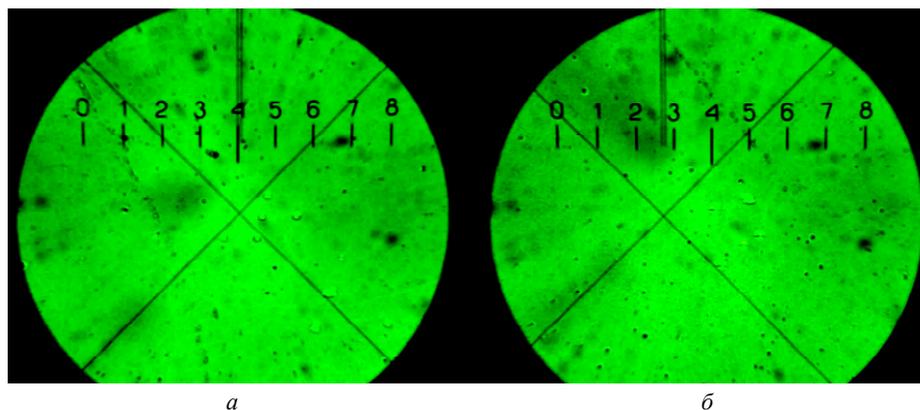


Рис. 4. Изображения поверхностей образцов с шунгитом при измерении микротвердости с нагрузкой: *a* – 1 г, *б* – 5 г
 Fig. 4. Images of the surfaces of samples with shungite when measuring microhardness at load: *a* – 1 g; *б* – 5 g

Изменение механической прочности и сопротивления ИТО при структурировании УНТ и шунгитом
 Changes in mechanical strength and resistance of ITO when modifying with CNTs and shungite

Тип образца	Микротвердость, 10^9 Па	k_1 (раз), в сравнении с чистым ИТО	Средняя величина сопротивления, Ом	k_2 (раз), в сравнении с чистым ИТО	Ссылка
ИТО	2.2...2.4	–	366.5 ± 43.8	–	Настоящая работа
ИТО + УНТ	4.2...4.8	2	183.2 ± 19.9	~0.5	[14]
ИТО + шунгит	8.0...20.0	3.6...8.3	2492 ± 174	~6.8	Настоящая работа

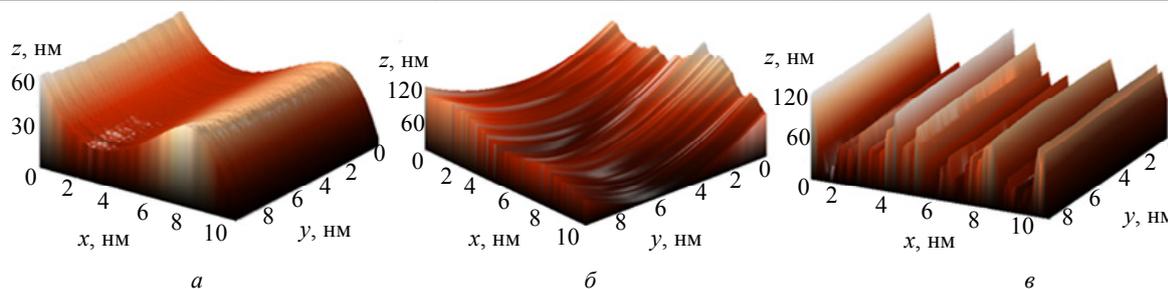


Рис. 5. Профили поверхностей образцов: *a* – чистый ИТО; *б* – ИТО, обработанный ПЭВ; *в* – ИТО, структурированный шунгитом

Fig. 5. Profiles of sample surfaces: *a* – pure ITO; *б* – ITO treated with SEW; *в* – ITO structured with shungite

световые нагрузки с высокой плотностью энергии или интенсивностью электромагнитных волн. Однако существенным недостатком добавления шунгита оказалось значительное увеличение сопротивления по сравнению с ИТО, структурированным углеродными нанотрубками. Это накладывает некие ограничения на области применения системы ИТО + шунгит, что может быть связано с повышением уровня прикладываемого напряжения питания к готовому электрооптическому прибору.

Результаты анализа рельефа поверхности продемонстрированы на рис. 5. Благодаря предварительной обработке поверхностной электромагнитной волной и последующему структурированию материала удалось достичь перестройки распределения высоты вдоль поверхности образцов. Такая перестройка актуальна для ЖК-устройств,

в которых варьирование шероховатости поверхности позволяет изменять угол наклона молекул, а значит, и фазовую задержку, и время отклика структуры [15]–[20]. Таким образом, модифицированная структура может быть использована в ЖК-ячейках как слой, комбинирующий в себе свойства ППП и ориентанта. Модель возможной ЖК-ячейки представлена на рис. 6.

Выводы и заключение. Проведя анализ полученных в ходе работы данных, можно сделать выводы:

1) прозрачные проводящие покрытия ИТО могут быть модифицированы наночастицами шунгита – возможного конкурента углеродных нанотрубок;

2) структурирование ИТО шунгитом позволяет получать существенно большее значение пропус-

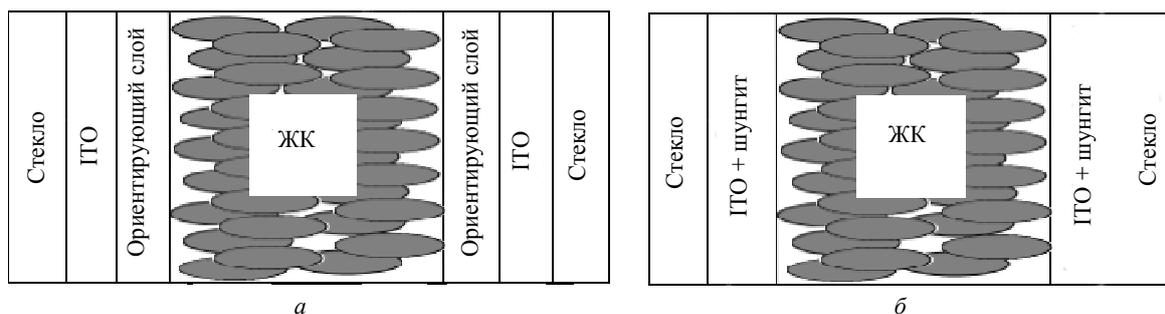


Рис. 6. Схематичное изображение простейшей ЖК-ячейки: а – без использования ИТО с шунгитом (ТЕ), б – создание слоя, объединяющего свойства ППП и ориентанта

Fig. 6. Schematic representation of the simplest LC cell: а – without the use of ITO with shungite; б – creation of a layer combining the properties of a conductive transparent coating and an orienting agent

кания в ИК-диапазоне и сдвиг на 40 нм в сторону больших длин волн в видимом диапазоне;

3) система ИТО + шунгит обладает большей прочностью по сравнению с чистым ИТО и системой ИТО+УНТ, что позволяет расширить область применения материала;

4) благодаря структурированию ИТО шунгитом можно добиться снижения потерь на отражение в сэндвич-структурах ЖК-ячеек, создавая меньшее количество функциональных слоев, поскольку модифицированный ИТО может комбинировать в себе свойства проводника и ориентанта;

5) существенное ограничение на применение ИТО с шунгитом накладывают весьма высокие

значения сопротивления, которые способствуют увеличению прикладываемого к компонентам напряжения.

Проведенный анализ полученных экспериментальных данных требует дальнейшего углубления с точки зрения проведения большего количества исследований, например определения рефрактивных параметров методом эллипсометрии, измерения подвижности носителей заряда с использованием эффекта Холла, а также изучения снимков, получаемых при использовании сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Список литературы

1. Reducing light reflection by processing the surface of silicon solar cells / S. Hu, Y. Lin, S. Su, L. Wu // J. of Materials Sci.: Materials in Electronics. 2020. Vol. 31. P. 7616–7622. doi: 10/1007s10854-020-03253-6.
2. Парфенов А. В., Компанец И. Н., Попов Ю. М. Пространственная модуляция света в фоточувствительных высококонтрастных структурах МДП с жидким кристаллом // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 2. С. 290–298.
3. Инновационная система нематический жидкий кристалл – наночастицы MoS_2 для оптоэлектронных дисплеев и модуляторов / Н. В. Каманина, А. С. Тойка, Я. В. Барнаш, Л. О. Федорова, Р. М. Таркан, Ю. А. Зубцова, П. В. Кушаков, С. В. Лихоманова, А. Zak // Жидкие кристаллы и их практическое применение. 2023. Т. 23, № 2. С. 52–62. doi: 10.18083/LCAppl.2023.2.52.
4. Эффект просветления и рельеф поверхности тонких пленок поливинилового спирта при варьировании концентрации оксида графена: возможные области применения / Н. В. Каманина, А. С. Тойка, Я. В. Барнаш, Л. О. Федорова, Р. М. Таркан, М. А. Ошколов, Ю. А. Зубцова, С. В. Лихоманова, П. В. Кушаков // Жидкие кристаллы и их практическое применение. 2023. Т. 23, № 3. С. 87–97. doi: 10.18083/LCAppl.2023.3.87.
5. Transparent high-performance thin film transistors from solution-processed $\text{SnO}_2/\text{ZrO}_2$ gel-like precursors /

- J. Jang, R. Kitsomboonloha, S. L. Swisher, E. S. Park, H. Kang, V. Subramanian // Advanced materials. 2012. Vol. 25, no. 7. P. 1042–1047. doi: 10.1002/ADMA201202997.
6. Горохова М. Н., Лебедев К. С., Платонова В. В. Особенности химического состава шунгита Карельского Заонежья // Изв. ТулГУ. Естественные науки. 2014. Т. 1, № 2. С. 236–240.
7. Мусина У. Ш., Самонин В. В. Углерод-минеральный состав шунгитовых пород коксуского месторождения Казахстана // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2013. № 19 (45). С. 39–41.
8. Мосин О. В., Игнатов И. И. Минерал шунгит. Структура и свойства // Наноиндустрия. 2013. № 3 (41). С. 32–39.
9. Мосин О. В., Игнатов И. И. Природный фуллереносодержащий минерал шунгит в производстве строительных материалов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. Т. 12 (179). С. 28–31.
10. Калинин Ю. Экологический потенциал шунгита // Наука в России. 2008. № 6. С. 39–45.
11. Компьютерное моделирование и наноскопические исследования структуры и свойств шунгита / Ю. Г. Яновский, Н. Н. Мягков, Е. А. Никитина, Ю. Н. Карнет, Х. Х. Валиев, В. А. Жогин, Ю. А. Гамлицкий // Механика композиционных материалов и конструкций. 2006. Т. 12, № 4. С. 513–529.

12. Пат. 2405177 (RU). Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и наноэлектроники при нивелировании границы раздела сред: твердая подложка – покрытие / Н. В. Каманина, П. Я. Васильев, В. И. Студенов. Приоритет от 23.12.2008; зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 27.11.2010.

13. Mechanical performance and applications of CNTs reinforced polymer composites: A Review / N. M. Nuzzari, F. A. Sabaruddin, M. M. Harussani, S. H. Kamarudin, M. Rayung, M. R. M. Asyraf, H. A. Aisyah, M. N. F. Norrahim, R. A. Ilyas, N. Abdullah, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, A. Khalina // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, iss. 9. P. 1–25. doi: 10.3390/nano11092186. URL: <https://www.semanticscho-lar.org/reader/3a12a18ed5bab1b8f1f4008aba3048d501d48198> (дата обращения 20.06.2023).

14. Kamanina N., Toikka A., Gladysheva I. ITO conducting coatings properties improvement via nanotechnology approach // *NanoExpress*. 2021. Vol. 2, № 1. P. 010006. doi: 10.1088/2632-959X/abd90c.

15. Xu P., Li X., Chigrinov V. Double cells achromatic ferroelectric liquid crystal displays using photoalignment technology // *Japanese J. of Appl. Phys.* 2006. Vol. 45 (1A). P. 200–202.

16. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. New developments in photo-aligning and photo-patterning technologies: physics and applications. *Optical Applications of Liquid Crystals* / ed. by L. Vicari. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003. P. 201–244.

17. Ono H., Kawatsuki N. Orientational photorefractive gratings observed in polymer dispersed liquid crystals doped with fullerene // *Japanese J. of Appl. Phys.* 1997. Vol. 36. Part 1. P. 6444–6448.

18. A mesoporous silica nanoparticle-doped photoalignment layer and liquid crystal layer for optimizing the rewriting speed and the response time of optically driving liquid crystal displays // *J. Sang, Y. Lai, J. Sun, J. Shang, S. Zhao // Crystals*. 2022. Vol. 12 (8): 1088. p.file:///D:/Data/2022/A_Mesoporous_Silica_Nanoparticle-Doped_Photo-Align.pdf.

19. A mixed fullerene – ferrocene thermotropic liquid crystal: synthesis, liquid – crystalline properties, supramolecular organization and photoinduced electron transfer / M. Even, B. Heinrich, D. Guillon, D. M. Guldi, M. Prato, R. Deschenaux // *European J. Chem.* 2001. № 7 (12). P. 2595–2604.

20. Khoo I. C. Holographic grating formation in dye- and fullerene C₆₀-doped nematic liquid-crystal film // *Optics Lett.* 1995. № 20 (20). P. 2137–2139.

Информация об авторах

Федорова Лариса Олеговна – студентка гр. 8299 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; лаборант-исследователь лаборатории электронного и программного обеспечения отдела прикладной ядерной физики отделения перспективных разработок ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия.

E-mail: loresafyoct@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-6753-4328>

Каманина Наталия Владимировна – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; зав. лабораторией фотофизики сред с нанобъектами ГОИ им. С. И. Вавилова; ведущий научный сотрудник ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия.

E-mail: nvkamanina@mail.ru

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

References

1. Reducing light reflection by processing the surface of silicon solar cells / S. Hu, Y. Lin, S. Su, L. Wu // *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*. 2020. Vol. 31. P. 7616–7622. doi: 10/1007/s10854-020-03253-6.

2. Parfenov A. V., Kompanec I. N., Popov Ju. M. Prostranstvennaja moduljacija sveta v fotochuvstvitel'nyh vysokorazreshajushih strukturah MDP s zhidkim kristal'nom // *Kvantovaja jelektronika*. 1980. T. 7, № 2. S. 290–298. (In Russ.).

3. Innovacionnaja sistema nematicheskij zhidkij kristall – nanochasticy MoS₂ dlja optoelektronnyh displeev i moduljatorov / N. V. Kamanina, A. S. Tojkka, Ja. V. Barnash, L. O. Fedorova, R. M. Tarkan, Ju. A. Zubcova, P. V. Kuzhakov, S. V. Lihomanova, A. Zak // *Zhidkie kristally i ih prakticheskoe primenenie*. 2023. T. 23, № 2. S. 52–62. doi: 10.18083/LCAppl.2023.2.52. (In Russ.).

4. Jeffect prosvetlenija i rel'ef poverhnosti tonkih plenok polivinilovogo spirta pri var'irovanii koncentracii

oksida grafena: vozmozhnye oblasti primenenija / N. V. Kamanina, A. S. Tojkka, Ja. V. Barnash, L. O. Fedorova, R. M. Tarkan, M. A. Oshkolov, Ju. A. Zubcova, S. V. Lihomanova, P. V. Kuzhakov // *Zhidkie kristally i ih prakticheskoe primenenie*. 2023. T. 23, № 3. S. 87–97. doi: 10.18083/LCAppl.2023.3.87. (In Russ.).

5. Transparent high-performance thin film transistors from solution-processed SnO₂/ZrO₂ gel-like precursors / J. Jang, R. Kitsomboonloha, S. L. Swisher, E. S. Park, H. Kang, V. Subramanian // *Advanced materials*. 2012. Vol. 25, no. 7. P. 1042–1047. doi: 10.1002/ADMA201202997.

6. Gorohova M. N., Lebedev K. S., Platonova V. V. Osobnosti himicheskogo sostava shungita Karel'skogo Zaonezh'ja // *Izv. TulGU. Estestvennyye nauki*. 2014. T. 1, № 2. S. 236–240. (In Russ.).

7. Musina U. Sh., Samonin V. V. Uglyerod-mineral'nyj sostav shungitovyh porod koksuskogo mestorozhdenija

Kazahstana // Izv. SPbGTI(TU). 2013. № 19 (45). S. 39–41. (In Russ.).

8. Mosin O. V., Ignatov I. I. Mineral shungit. Struktura i svojstva // Nanoindustrija. 2013. № 3 (41). S. 32–39. (In Russ.).

9. Mosin O. V., Ignatov I. I. Prirodnyj fullerenosoderzhashhij mineral shungit v proizvodstve stroitel'nyh materialov // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. 2013. T. 12 (179). S. 28–31. (In Russ.).

10. Kalinin Ju. Jekologicheskij potencial shungita // Nauka v Rossii. 2008. № 6. S. 39–45. (In Russ.).

11. Komp'juternoe modelirovanie i nanoskopicheskie issledovanija struktury i svojstv shungita / Ju. G. Janovskij, N. N. Mjagkov, E. A. Nikitina, Ju. N. Karnet, H. H. Valiev, V. A. Zhogin, Ju. A. Gamlickij // Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij. 2006. T. 12, № 4. S. 513–529. (In Russ.).

12. Pat. 2405177 (RU). Opticheskoe pokrytie na osnove orientirovannyh v jelektricheskom pole uglerodnyh nanotrubok dlja opticheskogo priborostroenija, mikro- i nanojelektroniki pri nivelirovanii granicy razdela sred: tverdaja podlozhka – pokrytie / N. V. Kamanina, P. Ja. Vasil'ev, V. I. Studenov. Prioritet ot 23.12.2008; zaregistririvan v Gos. reestre izobretenij RF 27.11.2010. (In Russ.).

13. Mechanical performance and applications of CNTs reinforced polymer composites: A Review / N. M. Nurazzi, F. A. Sabaruddin, M. M. Harussani, S. H. Kamarudin, M. Rayung, M. R. M. Asyraf, H. A. Aisyah, M. N. F. Norrrahim, R. A. Ilyas, N. Abdullah, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, A. Khalina // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, iss. 9. P. 1–25. doi: 10.3390/nano11092186. URL: <https://www.semanticscholar.org/reader/3a12a18ed5bab1b8f1f4008aba3048d501d48198> (data obraschenija 20.06.2023).

14. Kamanina N., Toikka A., Gladysheva I. ITO conducting coatings properties improvement via nanotechnology approach // NanoExpress. 2021. Vol. 2, № 1. P. 010006. doi: 10.1088/2632-959X/abd90c.

15. Xu P., Li X., Chigrinov V. Double cells achromatic ferroelectric liquid crystal displays using photoalignment technology // Japanese J. of Appl. Phys. 2006. Vol. 45 (1A). P. 200–202.

16. Chigrinov V. G., Kozenkov V. M., Kwok H. S. New developments in photo-aligning and photo-patterning technologies: physics and applications. Optical Applications of Liquid Crystals / ed. by L. Vicari. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003. P. 201–244.

17. Ono H., Kawatsuki N. Orientational photorefractive gratings observed in polymer dispersed liquid crystals doped with fullerene // Japanese J. of Appl. Phys. 1997. Vol. 36. Part 1. P. 6444–6448.

18. A mesoporous silica nanoparticle-doped photoalignment layer and liquid crystal layer for optimizing the rewriting speed and the response time of optically driving liquid crystal displays / J. Sang, Y. Lai, J. Sun, J. Shang, S. Zhao // Crystals. 2022. Vol. 12 (8): 1088. p.file:///D:/Data/2022/A_Mesoporous_Silica_Nanoparticle-Doped_Photo-Align.pdf.

19. A mixed fullerene – ferrocene thermotropic liquid crystal: synthesis, liquid – crystalline properties, supramolecular organization and photoinduced electron transfer / M. Even, B. Heinrich, D. Guillon, D. M. Guldi, M. Prato, R. Deschenaux // European J. Chem. 2001. № 7 (12). P. 2595–2604.

20. Khoo I. C. Holographic grating formation in dye and fullerene C₆₀-doped nematic liquid-crystal film // Optics Lett. 1995. № 20 (20). P. 2137–2139.

Information about the authors

Larisa O. Fedorova – student gr. 7282 of Saint Petersburg Electrotechnical University; Laboratory researcher at the Laboratory of Electronic and Software, Department of Applied Nuclear Physics, Advanced Research Department, PINP, National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia.

E-mail: loresafyoct@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-6753-4328>

Natalia V. Kamanina – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Photonics, Saint Petersburg Electrotechnical University; Head of the Laboratory of Photophysics of Environments with Nanoobjects, Vavilov State Optical Institute; part-time Leading Researcher at PINP, National Research Center «Kurchatov Institute», Gatchina, Russia.

E-mail: nvkamanina@mail.ru

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

Статья поступила в редакцию 06.07.2023; принята к публикации после рецензирования 10.11.2023; опубликована онлайн 30.01.2024.

Submitted 06.07.2023; accepted 10.11.2023; published online 30.01.2024.