

**Научная статья**

УДК: 532.783; 53.04; 535.016

**ЭФФЕКТ ПРОСВЕТЛЕНИЯ И РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК  
ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ОКСИДА ГРАФЕНА: ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ**

Н. В. Каманина<sup>1,2,3\*</sup>, А. С. Тойкка<sup>1,2,3</sup>, Я. В. Барнаш<sup>2,3</sup>, Л. О. Федорова<sup>2,3</sup>, Р. М. Таркан<sup>2</sup>,  
М. А. Ошколов<sup>2</sup>, Ю. А. Зубцова<sup>1,3</sup>, С. В. Лихоманова<sup>1,3,4</sup>, П. В. Кужаков<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup>АО НПО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», отдел «Фотофизика  
наноструктурированных материалов и устройств», Санкт-Петербург, Россия

АО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова», отдел «Фотофизика  
сред с нанобъектами», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский электротехнический университет («ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup>Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

---

**ИНФОРМАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 24.08.2023

Одобрена 22.09.2023

Принята 29.09.2023

**Ключевые слова:**

поливиниловый спирт,  
оксид графена,  
процесс сенсibilизации  
наночастицами,  
тонкие пленки,  
поляризаторы света,  
жидкие кристаллы,  
спектры пропускания,  
микротвердость,  
угол смачивания

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2023.3.87

---

**АННОТАЦИЯ**

Выполнен анализ экспериментально установленного варьирования пропускания (с учетом эффекта просветления) тонких пленок поливинилового спирта, сенсibilизированных оксидом графена с разной концентрацией последнего. Изучены механические свойства твердотельных пленочных композиций с таким сенсibilизатором. Зарегистрированы спектры пропускания пленок в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Измерена микротвердость полученных композиционных материалов. Экспериментальные результаты подтверждены квантово-химическим моделированием. Показана широкая область возможного применения изученных материалов: дисплейная техника, модуляторы света, конверторы лазерного излучения, выходные окна оптоэлектронных устройств, биомедицина.

**Для цитирования:**

Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Федорова Л. О., Таркан Р. М., Ошколов М. А., Зубцова Ю. А., Лихоманова С. В., Кужаков П. В. Эффект просветления и рельеф поверхности тонких пленок поливинилового спирта при варьировании концентрации оксида графена: возможные области применения // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 3. С. 87–97.

---

\*Адрес для переписки: [nvkamanina@mail.ru](mailto:nvkamanina@mail.ru)

© Каманина Н. В., Тойкка А. С., Барнаш Я. В., Федорова Л. О., Таркан Р. М., Ошколов М. А., Зубцова Ю. А., Лихоманова С. В., Кужаков П. В., 2023

**Research Article**

**EFFECT OF TRANSPARENCY INCREASING AND SURFACE RELIEF OF POLYVINYL ALCOHOL THIN FILMS WITH GRAPHENE OXIDE OF VARIED CONCENTRATIONS: POSSIBLE APPLICATIONS**

N. V. Kamanina<sup>1,2,3\*</sup>, A. S. Toikka<sup>2,3</sup>, Ya. V. Barnash<sup>3</sup>, L. O. Fedorova<sup>2,3</sup>, R. M. Tarkan<sup>2</sup>,  
 M. A. Oshkolov<sup>2</sup>, Yu. A. Zybtsova<sup>1,3</sup>, S. V. Likhomanova<sup>1,3,4</sup>, P. V. Kuzhakov<sup>1,3,5</sup>

<sup>1</sup>Lab for Photophysics of nanostructured materials and devices, Saint-Petersburg, Russia

Lab for Photophysics of media with nanoobjects at Vavilov state optical institute, St.- Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg electrotechnical university ("LETI"), Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Petersburg nuclear physics institute, National research center «Kurchatov institute», Gatchina, Russia

<sup>4</sup>Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

<sup>5</sup>Krylovsky state scientific center, Saint-Petersburg, Russia

**ARTICLE INFO:**

**Article history:**

Received 24 August 2023

Approved 22 September 2023

Accepted 29 September 2023

**Key words:**

polyvinyl alcohol,  
 graphene oxide,  
 nanoparticle sensitization  
 process, thin films,  
 light polarizers,  
 liquid crystals,  
 transmission spectra,  
 microhardness,  
 wetting angle

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2023.3.87

**ABSTRACT**

Analysis of the experimentally established transmission variation (taking into account the transparency increasing) of polyvinyl alcohol thin films sensitized with graphene oxide of different concentrations was performed. The mechanical features of these solid-state compositions were studied. Transmission spectra in the visible and near-infrared ranges were registered. The microhardness of the studied materials was measured. The experimental results were confirmed by the quantum chemical modeling. A wide range of possible applications of the studied materials is proposed: display technology, light modulators, laser radiation converters, output windows of optoelectronic devices, biomedicine.

**For citation:**

Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Fedorova L. O., Tarkan R. M., Oshkolov M. A., Zybtsova Yu. A., Likhomanova S. V., Kuzhakov P. V. Effect of transparency increasing and surface relief of polyvinyl alcohol thin films with graphene oxide of varied concentrations: possible applications. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (3), 87–97 (in Russ.).

\*Corresponding author: nvkamanina@mail.ru

© Kamanina N. V., Toikka A. S., Barnash Ya. V., Fedorova L. O., Tarkan R. M., Oshkolov M. A., Zybtsova Yu. A., Likhomanova S. V., Kuzhakov P. V., 2023

## Введение

Известно, что в силу ряда уникальных параметров, включая высокое пропускание в видимом и ближнем ИК-диапазонах, гибкость, водорастворимость, а также возможность изменения электрических и оптических характеристик, и пр., полимерные матрицы из поливинилового спирта (ПВС) широко используются в технике, как-то: в транзисторах, микроскопии, модуляторных и переключающих устройствах, в дисплеях компьютеров и телефонов, в биомедицине, акустооптике, других оптоэлектронных схемах и устройствах. При этом ПВС может выступать как, собственно, допирующий агент (с малой концентрацией, на уровне примерно 0,08 вес. %), применяемый для изменения проводимости полимера и его термостабильности, как, например, полимера *poly(3,4-ethylene dioxy thiophene)* : *poly(styrene sulfonate)* (PEDOT:PSS) [1], так и для изменения критических свойств биополимеров, где ширина запрещенной зоны и дипольный момент являются важными варьируемыми параметрами [2].

Для управления базовыми характеристиками ПВС в настоящее время существуют эффективные способы структурирования данной матрицы, например, наночастицами  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , Au, углеродными нанотрубками, шунгитами, др. Так, в работе [3] при введении наночастиц  $Al_2O_3$  в диапазоне концентраций от 0 до 70 мас. % исследователям удалось изменить диэлектрические параметры и подвижность носителей заряда. Кроме того, установлены варьируемые структурные модификации данной матрицы при анализе снимков, полученных с помощью электронной сканирующей микроскопии. Таким образом, показано эффективное применение структурированных составов ПВС для создания органических полевых транзисторов. В публикации [4] для допирования ПВС использовали наночастицы  $TiO_2$ , концентрация наночастиц варьировалась от 0,2 до 0,4 вес. %. Установлено изменение рефрактивных свойств, пропускания, ширины запрещенной зоны, а также диэлектрических параметров сенсibilизированного полимерного композита. Изменение люминесцентных свойств было проанализировано в статье [5] при введении в ПВС наночастиц Au. С точки зрения современных достижений в области гибкой электроники, основанных на полимерных технологиях, большой интерес вызывают данные публикации [6], где в полимерный состав биоразлагаемой ком-

позиции поли(винилпирролидон)/поли(виниловый спирт) (PVP/PVA, 50:50 мас. %) были введены наночастицы  $SnO_2$ . Обнаружено, что диспергирование небольших количеств наночастиц  $SnO_2$  (на уровне 1, 3 и 5 мас. %) в исходной матрице PVP/PVA обеспечивает улучшенные тепловые, оптические и диэлектрические свойства полученных допированных пленок. В работе [7] исследователи вводили в ПВС углеродные нанотрубки (УНТ); созданная композиция размещалась на кремниевой подложке, и изучался температурный коэффициент сопротивления (ТКС) системы в диапазоне температур 270–350 К. Установлено, что при прямом смещении для чистой ПВС-матрицы ТКС имеет отрицательный знак, а для структурированной углеродными нанотрубками – положительный. При обратном смещении знак ТКС изменялся на противоположный. Существенное изменение механических характеристик при введении УНТ с высоким модулем Юнга (от 0,65 до 5,5 ТПа – для одностенных УНТ и от 0,2 до 1,0 ТПа – для многостенных УНТ) в разные полимерные материалы, включая ПВС, описано в работе [8]. В более ранней публикации [9] авторами было выявлено увеличение микротвердости в 2,5 раза пленок ПВС при структурировании их углеродными нанотрубками.

По мере расширения класса наночастиц за счет открытия графена многие научно-технические группы стали использовать данный сенсibilизатор. В исследовании [10] показана возможность допирования ПВС восстановленным оксидом графена, а также выявлены рефрактивные особенности и магнито-диэлектрический эффект. Концентрация вводимого сенсibilизатора варьировалась от 0,5 до 1,0 вес. %. Установлено, что прямая запрещенная зона композитов PVA и rGO–PVA составляет 4,92 эВ и 3,8 эВ соответственно. Результаты изменения показателя преломления на длине волны 500 нм выявили тот факт, что включение восстановленного оксида графена в полимерную матрицу PVA может увеличить показатель преломления композитного материала с 1,28 примерно до 2,49.

Таким образом, введение наночастиц позволяет упорядоченно структурировать ПВС-матрицу, что приводит к изменению спектров пропускания, механических параметров, рефрактивных характеристик. Это, в свою очередь, способствует расширению области применения ПВС.

На рисунке 1 показаны возможные области использования поливинилспиртовых композиций

как поляризационных слоев, ориентирующих пленок, поглощающих конструкций.

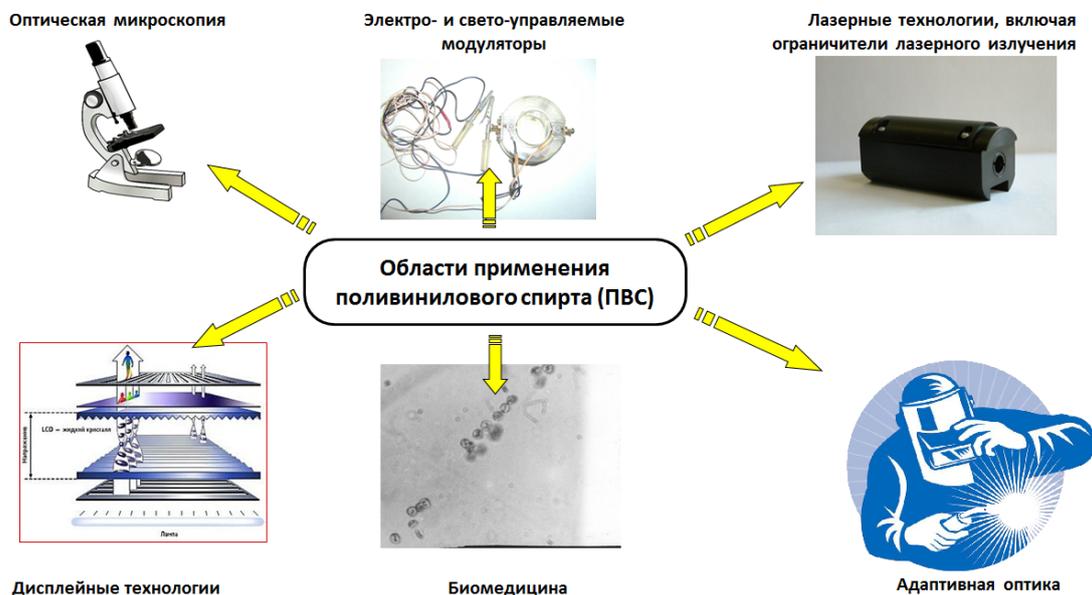


Рис. 1. Возможные области применения материалов на основе поливинилового спирта

Fig. 1. Possible application areas of materials based on polyvinyl alcohol

Введение наночастиц приводит не только к изменению базовых физико-химических параметров матричного ПВС, но и вызывает изменение его поверхности.

В настоящей работе при многократных наблюдениях впервые установлено увеличение пропускания (эффект просветления) ПВС-пленок в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра при введении наночастиц оксида графена с определенной концентрацией (установлен порог концентрационного диапазона); проведено квантово-химическое моделирование, доказывающее образование связей между оксидом графена и ПВС-молекулами. Расчет подтверждает процесс упорядочения матричной системы, что вызывает увеличение пропускания света за счет роста пропускания параллельной световой компоненты. Данное обстоятельство полезно при синтезе поляризационных пленок с увеличенным дихроизмом пропускания. Проанализирован рельеф поверхности при тестировании микротвердости и углов смачивания.

Проведенные исследования позволяют расширить области использования ПВС с наночастицами практически для каждого направления, как показано на рис. 1.

### Экспериментальные условия

В исследовании использовались отечественные составы ПВС марки БКК ПВС 40/2 с высокой молекулярной массой на уровне 300 000 а.е. Данные композиции выгодно отличаются от аналога ПВС (№ 182480-500MG по каталогу *Alfa Aesar u Aldrich*) с молекулярной массой 100000 а.е., поскольку составы с более высокой молекулярной массой (определяемой числом  $\text{CH}_2$ -фрагментов и гидроксильными группами) имеют лучшую пленкообразующую способность матричного материала. Был приготовлен 1 %-й водный раствор ПВС. Заметим, что изготовление тонких пленок из раствора порошка ПВС в воде является довольно длительным процессом.

В первую очередь порошок ПВС заливают дистиллированной водой в необходимой пропорции и оставляют на 10–14 ч. После набухания ПВС и перехода его в гелеподобное состояние начинается процесс растворения. Для получения однородного прозрачного водного раствора сосуд с набухшим ПВС помещают на водяную баню и дополнительно включают мешалку для постоянного перемешивания. Температура водяной бани составляет  $\sim 100$  °С. Размешивающее устройство должно совершать не более одного оборота в секунду. При несоблюдении последнего требования и увеличении скорости мешалки в растворе ПВС будут образовываться пузырьки воздуха, которые впоследствии приведут к неоднородности отлитой пленки. Процесс растворения ПВС на водяной бане при постоянном размешивании занимает порядка 3–4 ч. По истечении указанного времени раствор ПВС должен стать прозрачным, что тестируется визуально. После этого баню и мешалку отключают, а ПВС оставляют остужаться.

В качестве сенсibilизатора использовался отечественный 1 %-й раствор оксида графена (полученный из ООО «НаноТехЦентр», Тамбов, Россия). Варьирование сенсibilизатора на основе оксида графена в матричном растворе ПВС было в диапазоне от 0,1 до 5,0 вес. %.

Пленки толщиной  $\sim 50$ – $60$  мкм формировались на стеклянной подложке крон К8 методом центрифугирования с частотой вращения центрифуги 1500 оборотов в минуту. После высыхания в течение суток пленки подвергались тестированию разными методами.

Для изучения спектральных характеристик применялся спектрофотометр СФ-26, функционирующий в диапазоне длин волн 200–1200 нм. Для контроля спектральных измерений в видимом диапазоне оптического спектра использовались калиброванные фильтры. Ошибка в измерениях спектров составляла около 0,2 %. Спектры в ИК-диапазоне диагностировались на приборе ФСМ 1211 (ООО «Инфраспек»). Микротвердость тестировалась на приборе ПМТ-3М (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург).

Квантово-химическое моделирование было выполнено с помощью программ *GaussView5.0*, *Gaussian 09W* [11–13]; применен метод расчета и атомный базисный набор Хартри-Фока HF/STO-3G SP.

## Результаты и обсуждение

Основные результаты проведенного исследования показаны на рис. 2 и 3, а также в табл. 1. На рисунке 2 приведены спектральные характеристики пленки ПВС с оксидом графена при варьировании концентрацией последнего, измеренные в видимой (рис. 2, а) и ближней ИК-области (рис. 2, б) спектра.

В видимом диапазоне спектра при концентрации оксида графена  $\sim 0,1$  вес. % практически нет изменений в пропускании композитной системы. При увеличении концентрации оксида графена от 0,5 до 1,0 вес. % наблюдается слабое уменьшение пропускания, а при увеличении до 5,0 вес. % происходит существенное уменьшение пропускания композита. Заметим, что ПВС с концентрацией оксида графена в диапазоне 0,1–1,0 вес. % вполне пригоден в качестве матрицы для создания поляризаторов видимого диапазона спектра, в том время как ПВС с концентрацией допанта на уровне 5,0 вес. % может быть рекомендован для создания поглощающей среды для ограничения оптического излучения в данной спектральной области.

Интересный эффект наблюдается при анализе спектра композиционных пленок в ближнем ИК-диапазоне. Видно, что при малых концентрациях вводимого сенсibilизатора (на уровне 0,1–0,5 вес. %) наблюдается увеличение пропускания света, по сравнению с чистой матрицей ПВС. При концентрации оксида графена 1,0 вес. % существенного ослабления светового пучка не происходит, следовательно, данный композит также вполне пригоден для формирования поляризационной пленки с высоким пропусканием света для параллельной его компоненты. При концентрациях оксида графена 5,0 вес. % пропускание составляет выше 50 %, а значит, этот материал может быть рассмотрен для возможной разработки ограничителей лазерного излучения.

Процесс взаимодействия между ПВС-молекулами и наночастицами оксида графена, представленный на основе квантово-химического моделирования, вполне аргументированно показывает образование связей между фрагментами ПВС и оксида графена. Более того, сетка оксида графена может способствовать четкому упорядочению ламелей полимера, что вызывает

изменение рефрактивных параметров, а как следствие – пропускания.

На рисунке 3 представлены результаты расчета, сделанные для системы ПВС – оксид графена. В модели ПВС с оксидом графена был учтен

351 атом: 234 атома углерода, 41 – кислорода, 108 – водорода. При этом в структуре ПВС – 2 атома углерода, 4 атома водорода, 1 атом кислорода, а в структуре оксида графена было 40 атомов кислорода, 232 атома углерода и 104 атома водорода.

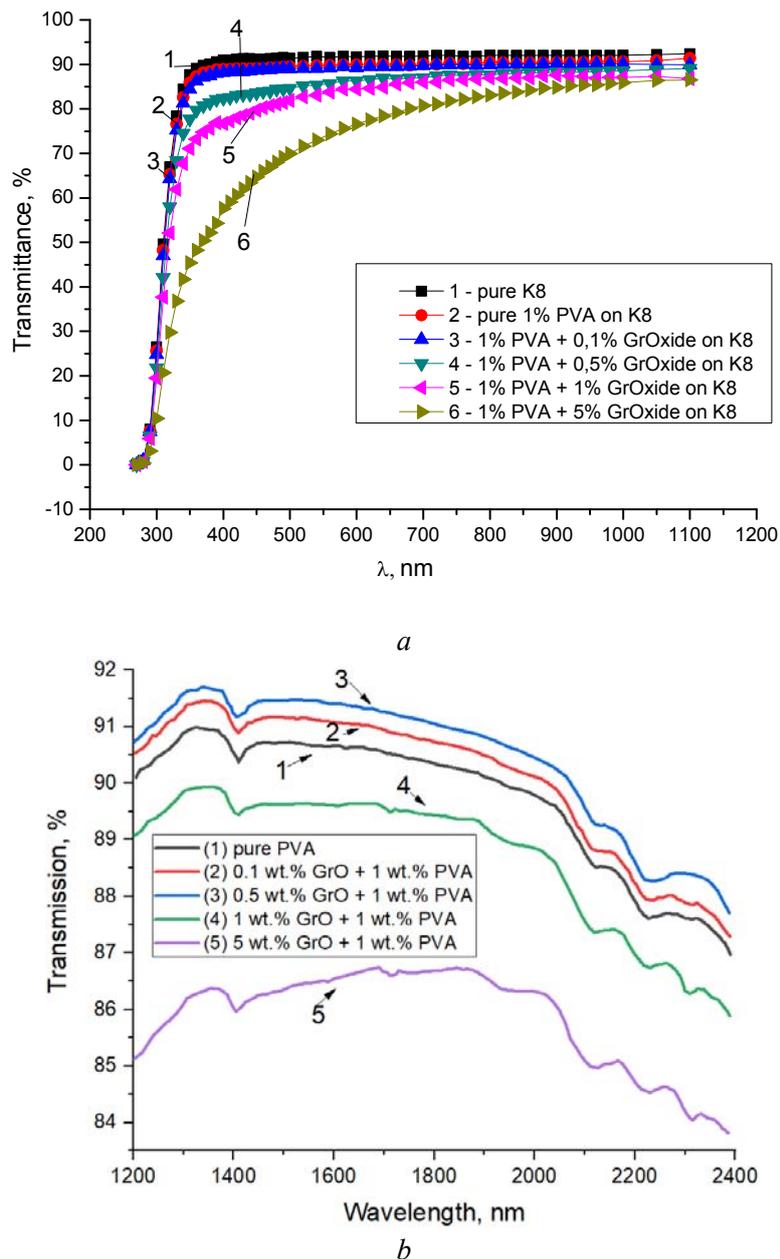


Рис. 2. Спектры пропускания пленок ПВС с оксидом графена с разной концентрацией, полученные в видимом (а) и ближнем ИК (b) диапазонах

Fig. 2. Transmission spectra of the PVA–GrO films in the visible (a) and near-IR (b) ranges

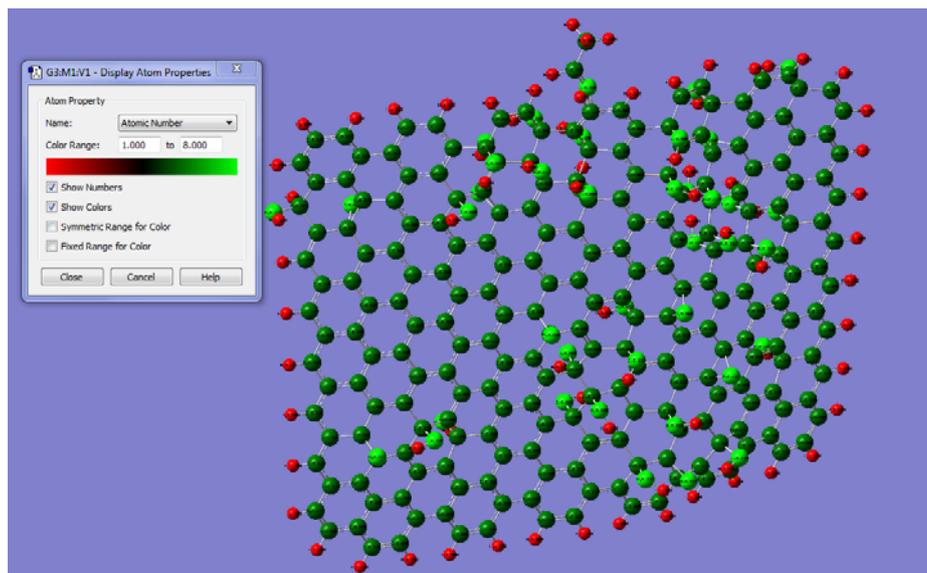


Рис. 3. Картина распределения связей в системе ПВС с оксидом графена. Качественная модель возможного взаимодействия между молекулой ПВС и наночастицами оксида графена (плоскость), полученная с помощью программы *GaussView5.0, Gaussian 09W*

Fig. 3. Distribution of bonds in the system of PVA with the graphene oxide (GrO) nanoparticles (in plane). Qualitative model of possible interaction between PVA molecules and GrO nanoparticles obtained with the help of *GaussView5.0, Gaussian 09W* program

Видно (см. данные рис. 3), что плоскость оксида графена выступает как направляющая для более эффективной ориентации ПВС ламелей. Стоит обратить внимание на тот факт, что, по крайней мере, в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра показатели преломления матрицы ПВС ( $n \sim 1,5$ ) и оксида графена в общем-то близки по значениям, что позволяет создавать, практически, иммерсионный композит. Заметим, что до сих пор в научно-технической литературе нет четких данных, напрямую определяющих значение показателя преломления графена, оксида графена и восстановленного оксида графена, что можно было бы использовать, как данные из каталога для конкретной длины волны. Тем не менее, в работе [14] представлены близкие для разных растворителей значения показателя преломления оксида графена на разных длинах волн. Так, в области длин волн 300–1000 нм показатель преломления оксида графена изменяется от 1,95 до 1,75. В публикации [15] для тех же длин волн показаны значения для обыкновенного и необыкновенного показателей преломления в диапазоне 1,85–1,73 и 1,55–1,54, соответственно. В статье [16] для диапазона длин волн 400–800 нм показано практически стационар-

ное значение показателя преломления оксида графена на уровне  $\sim 1,75$ . Полезные данные для показателя преломления оксида графена приведены в публикации [17], где тонкие пленки были сформированы на стеклянной подложке. Исследователями приведены значения показателя преломления в диапазоне 1,65–1,45 для длин волн от 400 до 850 нм. Таким образом, при изменении длины волны ближе к ИК-диапазону наблюдается полное соответствие по показателям преломления ПВС и оксида графена.

Итак, возможное более упорядоченное расположение молекул ПВС «на сетке – плоскости» оксида графена способствует увеличению пропускания параллельной световой компоненты, оставляя без изменения пропускание ортогональной составляющей, что тестировалось в дальнейших экспериментах при изготовлении тонкопленочных поляризаторов лазерного излучения на основе матрицы ПВС, структурированной оксидом графена. Первые результаты, показывающие эффективность создания тонкопленочных поляризаторов на основе системы ПВС-оксид графена, были недавно обсуждены в работе [18].

Перейдем к рассмотрению механических параметров исследуемой системы, которые существенно влияют на рельеф поверхности данного композита. В таблице 1 приведены результаты установленной закономерности изменения (увеличения) микротвердости пленок ПВС при варьировании

концентрацией оксида графена. Стоит ожидать существенного влияния углеродного каркаса на микротвердость ПВС-пленки. Действительно, данные таблицы 1 не противоречат выдвинутому предположению.

**Таблица 1. Микротвердость тонких пленок на основе 1 %-го водного раствора ПВС с разной концентрацией оксида графена**

**Table 1. Microhardness of thin films based on 1 % aqueous solution of PVA with different graphene oxide concentrations**

| Нагрузка (P), гр | Микротвердость (H), МПа |                 |                 |                 |                 |
|------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                  | Чистая ПВС-матрица      | ПВС + 0,1 % GrO | ПВС + 0,5 % GrO | ПВС + 1,0 % GrO | ПВС + 5,0 % GrO |
| 0,5              | 26,20                   | 26,54           | 44,55           | 17,2            | –               |
| 1                | 17,00                   | 17,02           | 19,21           | 21,84           | 31,69           |
| 2                | 14,5                    | 14,8            | 16,02           | 18,11           | 17,05           |
| 3                | 7,47                    | 7,76            | 10,13           | 9,8             | 10,19           |
| 4                | 5,37                    | 5,6             | 6,94            | 8,38            | 7,53            |
| 5                | 4,31                    | 4,55            | 5,51            | 6,45            | 5,31            |

Напомним, что в работе изучалось изменение механических параметров (при тестировании микротвердости) тонких пленок из 1 %-го водного раствора ПВС, сенсibilизированного оксидом графена в концентрации 0,1; 0,5; 1,0; 5,0 вес. %, наносимых на стекло марки крон К8. Минимальная нагрузка составляла 0,5 гр. На образцах с концентрацией оксида графена 5,0 вес. % при указанной нагрузке индентор не оставлял на поверхности пленок отпечатков. Для образцов с концентрацией оксида графена 0,1 и 0,5 вес. % при максимально используемой нагрузке 6 гр происходит разрушение материала пленки.

Стоит заметить, что высокие значения для микротвердости изучаемых образцов ПВС при увеличении концентрации оксида графена могут быть объяснены высокими значениями модуля Юнга углеродных наночастиц, что не противоречит результатам других научно-технических групп, что тестируют разные полимерные композиции при допировании их углеродными наночастицами на основе нанотрубок, графена, оксида графена, др. [8, 19–21].

Проведенный анализ полученных экспериментальных данных требует дальнейшего углубления с точки зрения применения более широкого инструментария, к примеру: сканирующего электронного микроскопа (для визуализации влияния

углеродного каркаса на поверхность ПВС); эллипсометра (для сравнительного изменения показателя преломления ПВС при варьировании концентрации оксида графена); атомно-силового микроскопа и прибора для измерения угла смачивания поверхности (для выявления процесса изменения шероховатости, а также разграничения разных физических механизмов, приводящих к смене гидрофильности на гидрофобность материалов), др. Немаловажно также провести нелинейно-оптические измерения с целью выявления порога ограничения и срока службы лимитеров на основе сенсibilизированного ПВС-состава. Указанные выше этапы дальнейшей работы с таковыми композициями являются предметом дальнейшего экспериментального и теоретического изучения.

### **Заключение**

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Наночастицы оксида графена вполне могут дополнить ряд эффективных сенсibilизаторов, применяемых для изменения свойств поливинилспиртовых композиций, используемых в разных областях науки и техники, а именно: в модуляционной и поляризационной оптике, в микроскопии, биомедицине, лазерной технике, др.

2. Введение оксида графена в малых концентрациях в матрицу ПВС приводит к проявлению эффекта просветления, что наиболее наглядно показано для ближней ИК-области спектра.

3. Экспериментально установленные значения высокого пропускания ПВС с малыми концентрациями оксида графена способствуют увеличению пропускания параллельной световой компоненты при разработке тонкопленочных поляризаторов света на основе ПВС-матрицы.

4. Экспериментально установленные значения высокого пропускания для малых световых потоков ПВС с большими концентрациями оксида графена способствуют изучению эффекта ограничения для данных композитов.

5. Одним из применений ПВС, сенсibilизированного оксидом графена при варьировании концентрации последнего вполне может быть использовано для создания разных ориентирующих рельефов для жидкокристаллических молекул в оптоэлектронных устройствах, использующих ЖК-мезофазу для модуляции световых потоков.

6. Введение оксида графена в ПВС-матрицу приводит к увеличению микротвердости, что, естественно, позволяет рекомендовать данные композиции как самостоятельные оптоэлектронные элементы, без запрессовывания тонких ПВС-пленок между стеклами или ламинирующими составами.

7. Довольно наглядные результаты исследований, проведенные с ПВС-матрицей при сенсibilизации ее оксидом графена, позволяют рекомендовать их в качестве лабораторного материала в образовательном процессе для привлечения студентов и аспирантов к наукоемкой области деятельности человека и становления молодых ученых.

**Благодарности:** работа выполнена как инициативная для дальнейшего продвижения сотрудничества с разными лабораториями России и зарубежья, разрабатывающими тонкопленочные органические композиты для целей оптоэлектроники. Авторы выражают признательность своим коллегам по отделу Перспективных разработок (ПИЯФ, Гатчина), а также сотрудникам кафедры фотоники «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург) за конструктивные вопросы на лабораторных семинарах.

Часть результатов была представлена и обсуждалась на Школе-конференции в Сибири (Большие Коты, Байкал, июль 2022), что была организована Иркутским государственным университетом, а также обсуждалась на конференции «Прикладная Опти-

ка» (в рамках Нанотехнологической секции, декабрь 2022, Санкт-Петербург, Россия).

**Acknowledge:** the work was carried out as an initiative to further promote cooperation with various laboratories in Russia and abroad, which were developing thin-film organic composites for optoelectronics purposes. The authors express their gratitude to their colleagues in the Department of Advanced Developments (Nuclear Physics Institute, Gatchina), as well as to the staff of the Department of Photonics of LETI (St. Petersburg) for constructive questions at laboratory seminars.

Some of the results were presented and discussed at a School conference in Siberia (Big Cats, Baikal, July 2022), which was organized by Irkutsk State University, and also discussed at the Applied Optics conference (within the Nanotechnology Section, December 2022, St. Petersburg, Russia).

#### Список источников / References

1. Romyen N., Thongyai S., Praserttham P., Sotzing G.A. Enhancement of poly(3,4-ethylenedioxy thiophene)/poly(styrene sulfonate) properties by poly(vinyl alcohol) and doping agent as conductive nano-thin film for electronic application. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2013, **24** (8), 2897–2905. DOI: 10.1007/s10854-013-1188-0.
2. Fahmy A., Khafagy R.M., Elhaes H., Ibrahim M.A. Molecular properties of polyvinyl alcohol/ sodium alginate composite. *Biointerface Res. Appl. Chem.*, 2020, **10** (1), 4734–4739. DOI: 10.33263/BRIAC101.734739.
3. Canimkurbey B., Cakirlar C., Piravadili Mucur S., Yasin M., Berber S. Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles incorporation on the dielectric properties of solution processed PVA films for organic field effect transistor applications. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2019, **30** (20), 18384–18390. DOI: 10.1007/s10854-019-02192-1.
4. Abdel-Baset T.A. Dielectric and optical properties of PVA/PAN doped TiO<sub>2</sub> NPs. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2020, **31** (18), 15960–15967. DOI: 10.1007/s10854-020-04157-1.
5. Xuemiao Zhao, Lianyu Zhang, Xin Lv, Jinhua Liu, Xinxin Liu, Yuting Zhang, Dong Zhang, Shuhong Li, and Qingru Wang. Large-area fluorescence enhancement of R6G based on a uniform PVA-Au plasmonic substrate. *Optics Express*, 2022, **30** (24), 43281–43292. DOI: 10.1364/OE.472908.
6. Sengwa R.J., Dhatarwal P. Nanofiller concentration-dependent appreciably tailorable and multifunctional properties of (PVP/PVA)/SnO<sub>2</sub> nanocomposites for advanced flexible device technologies. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2021, **32** (7), 9661–9674. DOI: 10.1007/s10854-021-05627-w.

7. Васин С. В., Ефимов М. С., Сергеев В. А. Особенности токопередачи в пленках поливинилового спирта с включениями многостенных углеродных нанотрубок на подложках Si // *Письма в ЖТФ*, 2020, Т. 46, вып. 12. С. 26–29. DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49523.18277. [Vasin S.V., Efimov M.S., Sergeev V.A. Characteristics of current transfer in PVA films with dispersed multiwall carbon nanotubes on silicon substrates. *Tech. Phys. Lett.*, 2020, **46** (6), 595–598. DOI: 10.1134/S1063785020060279].
8. Nurazzi N.M., Sabaruddin F.A., Harussani M.M., Kamarudin S.H., Rayung M., Asyraf M.R.M., Aisyah H.A., Norrrahim M.N.F., Ilyas R.A., Abdullah N., Zainudin E.S., Sapuan S.M., Khalina A. Mechanical performance and applications of CNTs reinforced polymer composites: A Review. *Nanomaterials*, 2021, **11** (9), 2186 (25 p.). DOI: 10.3390/nano11092186.
9. Каманина Н. В., Лихоманова С. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И., Чернозатонский Л. А., Ваганов В. Е., Мишаков И. В. Изменение поверхностных свойств тонкопленочных поляризаторов с углеродными наноструктурами. *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37, вып. 24. С. 49–56. [Kamanina N.V., Likhomanova S.V., Vasilyev P.Ya., Studeonov V.I., Chernozatonskii L.A., Vaganov V.E., Mishakov I.V. Surface properties of thin film polarizers modified by carbon nanostructures. *Tech. Phys. Lett.*, 2011, **37** (12), 1165–1167. DOI: 10.1134/S1063785011120236].
10. Ghosh T.N., Bhunia A.K., Pradhan S.S., Sarkar S.K. Electric modulus approach to the analysis of electric relaxation and magnetodielectric effect in reduced graphene oxide–poly(vinyl alcohol) nanocomposite. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2020, **31** (18), 15919–15930. DOI: 10.1007/s10854-020-04153-5.
11. Бутырская Е. В. Компьютерная химия: Основы теории и работа с программами Gaussian и Gaussview. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. 224 с. [Butyrskaya E.V. Computer chemistry: Fundamentals of theory and work with Gaussian and Gaussview programs. M.: Solon press, 2011, 224 p. (in Russ.)].
12. Ochterski J.W. Thermochemistry in Gaussian. Gaussian, Inc., 2000, 19 p.
13. The official Gaussian website. Available at: <http://www.gaussian.com/index.htm>
14. Rasheed M., Shihab S., Sabah O.W. An investigation of the structural, electrical and optical properties of graphene-oxide thin films using different solvents. *J. Phys.: Conf. series*. IOP Publishing, 2021, **1795** (1), 012052 (12 p.). DOI:10.1088/1742-6596/1795/1/012052.
15. Schöche S., Hong N., Khorasaninejad M., Ambrosio A., Orabona E., Maddalena P., Capasso F. Optical properties of graphene oxide and reduced graphene oxide determined by spectroscopic ellipsometry. *Appl. Surf. Sci.*, 2017, **421**, 778–782. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.01.035.
16. Jung I., Vaupel M., Pelton M., Piner R., Dikin D.A., Stankovich S., Jinho An, Ruoff R.S. Characterization of thermally reduced graphene oxide by imaging ellipsometry. *Phys. Chem. C*, 2008, **112** (23), 8499–8506.
17. Schmiedova V., Pospisil J., Kovalenko A., Ashcheulov P., Fekete L., Cubon T., Kotrusz P., Zmeskal O., Weiter M. Physical properties investigation of reduced graphene oxide thin films prepared by material inkjet printing. *Hindawi Journal of Nanomaterials*, 2017, **2017**. Article ID 3501903 (8 p.). DOI: 10.1155/2017/3501903.
18. Лихоманова С. В., Зубцова Ю. А., Каманина Н. В. Поляризационные свойства йодно-поливинилспиртовых поляризаторов, сенсibilизированных оксидом графена // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90, № 7. С. 101–106. [Likhomanova S.V., Zubtsova Yu.A., Kamanina N.V. Polarization properties of iodine-polyvinyl alcohol polarizers sensitized with graphene oxide. *Optical Journal*, 2023, **90** (7), 101–106 (in Russ.). DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-101-106].
19. Cadek M., Coleman J.N., Barron V., Hedicke K., Blau W.J. Morphological and mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced semicrystalline and amorphous polymer composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81** (27), 5123–5125.
20. Yesaswi C.S., Sahu S.K., Sreekanth P.S.R. Experimental investigation of electro-mechanical behavior of silver-coated teflon fabric-reinforced nafion ionic polymer metal composite with carbon nanotubes and graphene nanoparticles. *Polymers*, 2022, **14** (24), 5497 (14 p.). DOI: 10.3390/polym14245497.
21. Kausar A., Ahmad I., Zhao T., Aldaghri O., Ibnaouf K.H., Eisa M.H. Multifunctional polymeric nanocomposites for sen-sing applications – design, features, and technical advancements. *Crystals*, 2023, **13** (7), 1144 (20 p.). DOI: 10.3390/cryst13071144.

#### Вклад авторов:

- <sup>1</sup>Каманина Н. В. – определение задания каждому участнику, планирование работы, анализ данных, выводы, написание draft и окончательного варианта статьи.
- <sup>2</sup>Тойкка А. С. – измерение спектров в ИК-диапазоне.
- <sup>3</sup>Барнаш Я. В. – участие в дискуссии.
- <sup>4</sup>Федорова Л. О. – участие в дискуссии.
- <sup>5</sup>Таркан Р. М. – участие в дискуссии.
- <sup>6</sup>Ошколов М.А. – участие в дискуссии
- <sup>7</sup>Зубцова Ю. А. – изготовление ПВС-раствора.
- <sup>8</sup>Лихоманова С. В. – измерение спектров в видимом диапазоне и измерение микротвердости.
- <sup>9</sup>Кузжаков П. В. – пробные квантово-химические вычисления.

**Contribution of the authors:**

<sup>1</sup>**Kamanina N.V.** – defining tasks for each participant, planning work, data analysis, conclusions, writing draft and final version of the article.

<sup>2</sup>**Toikka A.S.** – IR-spectra measuring

<sup>3</sup>**Barnash Ya. V.** – participation on the discussion.

<sup>4</sup>**Fedorova L. O.** – participation on the discussion.

<sup>5</sup>**Tarkan R. M.** – participation on the discussion.

<sup>6</sup>**Ошколов М.А.** - participation on the discussion.

<sup>7</sup>**Zubtsova Yu. A.** – PVA solutions development.

<sup>8</sup>**Likhomanova S. V.** – VIS-spectra measuring and micro-hardness test.

<sup>9</sup>**Kuzhakov P.V.** – trial quantum-chemical simulations.

<sup>1</sup>Orcid – 0000-0002-2903-2685

<sup>2</sup>Orcid – 0000-0002-8694-8497

<sup>3</sup>Orcid – 0000-0002-3449-9044

<sup>4</sup>Orcid – 0009-0001-6753-4328

<sup>5</sup>Orcid – 0009-0004-5521-779X

<sup>6</sup>Orcid – 0009-0004-9723-7879

<sup>7</sup>Orcid – 0000-0002-1738-0199

<sup>8</sup>Orcid – 0000-0002-1554-8410

<sup>9</sup>Orcid – 0000-0002-9302-3265

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Поступила 24.08.2023, одобрена 22.09.2023, принята 29.09.2023*

*Received 24.08.2023, approved 22.09.2023, accepted 29.09.2023*