

## Физическое материаловедение

Научная статья

УДК 564.163.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18412>

### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ФУЛЛЕРЕНОЛА НА ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА КОМПОЗИТНЫМИ ПЛЕНКАМИ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

Е. А. Никитина <sup>1</sup>, В. М. Капралова <sup>1</sup>, Н. Т. Сударь <sup>1□</sup>,  
В. И. Герасимов <sup>1</sup>, С. А. Утаев <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Каршинский государственный университет, г. Карши, Узбекистан  
□ sudar53@mail.ru

**Аннотация.** Представлено исследование влияния добавок фуллеренола  $C_{60}(OH)_{44}$  различной концентрации на оптические свойства пленок поливинилового спирта (ПВС). Установлено, что добавка даже небольшой концентрации фуллеренола приводит к значительному поглощению света в УФ-области спектра. По мере увеличения концентрации фуллеренола с 1 до 10 масс.% граница пропускания света композитными пленками ПВС: $C_{60}(OH)_{44}$  смещается от 230 к 440 нм. Для ряда длин волн рассчитана зависимость коэффициента экстинкции (КЭ) от концентрации фуллеренола в пленках; при повышении концентрации  $C_{60}(OH)_{44}$  от 1 до 3 масс.% КЭ снижается, но далее его значение стабилизируется. Показано, что поглощение света в изученных объектах связано с возбуждением молекул фуллеренола при непрямах переходах НОМО → LUMO. Согласно оценке, значение зазора НОМО – LUMO составляет  $2,2 \pm 0,3$  эВ и мало зависит от концентрации фуллеренола.

**Ключевые слова:** поливиниловый спирт, фуллеренол, коэффициент экстинкции, оптический спектр, энергетический зазор

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0016).

**Для цитирования:** Никитина Е. А., Капралова В. М., Сударь Н. Т., Герасимов В. И., Утаев С. А. Влияние добавок фуллеренола на поглощение света композитными пленками на основе поливинилового спирта // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 4. С. 167–176. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18412>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Originalarticle

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18412>

### INFLUENCE OF FULLERENOL DOPANT ON LIGHT ABSORPTION BY POLYVINYL ALCOHOL-BASED COMPOSITE FILMS

Е. А. Nikitina <sup>1</sup>, V.M. Kapralova <sup>1</sup>, N.T. Sudar <sup>1□</sup>,  
V. I. Gerasimov <sup>1</sup>, S. A. Utaev <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Karshi State University, Karshi, Uzbekistan  
□ sudar53@mail.ru

**Abstract.** The study of the effect of fullereneol ( $C_{60}(OH)_{44}$ ) dopant of different concentrations on the optical properties of polyvinyl alcohol (PVA) films has been presented. The addition of even a small concentration of fullereneol was found to lead to significant light absorption in the UV spectral range. As the concentration of fullereneol increased from 1 to 10 wt.%, the light transmission edge of the PVA :  $C_{60}(OH)_{44}$  composite films shifted from 230 to 440 nm. The dependences of the extinction coefficient (EC) on the fullereneol concentration in the films were calculated for several wavelengths; these curves decreased with  $C_{60}(OH)_{44}$  concentration increasing from 1 to 3 wt.%, but then EC values stopped decreasing. The light absorption in the studied samples was shown to be caused by the fullereneol molecules' excitation during indirect HOMO  $\rightarrow$  LUMO transitions. The  $E_g$  value estimated from their spectra, was  $2.2 \pm 0.3$  eV and depended little on the fullereneol concentration.

**Keywords:** polyvinyl alcohol, fullereneol, extinction coefficient, optical spectrum, energy gap

**Funding:** The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2023-0016).

**For citation:** Nikitina E. A., Kapralova V. M., Sudar N. T., Gerasimov V. I., Utaev S. A., Influence of fullereneol dopant on light absorption by polyvinyl alcohol-based composite films, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 167–176. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18412>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы широко применяются в электронике в качестве конструкционных и функциональных материалов. Среди всего многообразия полимеров особый интерес представляют водорастворимые полимеры, в частности поливиниловый спирт (ПВС). Его отличают невысокая стоимость, экологическая безопасность, прозрачность, хорошие диэлектрические характеристики и отличные пленкообразующие свойства. ПВС – это термопластичный аморфно-кристаллический полимер, в котором области с высокой степенью упорядочения и плотной упаковкой молекул (кристаллиты) беспорядочно ориентированы внутри аморфных областей [1]. Композитные материалы на основе ПВС предполагается использовать при изготовлении органических полевых транзисторов [2], тонкопленочных поляризаторов [3], полимерных аппретов [4], оптоэлектронных устройств [5].

Введение в ПВС даже небольшого количества допанта может привести к существенному изменению его физических свойств. Значительный интерес представляют добавки, не ухудшающие водорастворимость ПВС, например водорастворимые полигидроксильные производные фуллерена – фуллеренолы [6 – 8]. Благодаря наличию в молекулах фуллеренола и ПВС гидроксильных групп, между ними возникают водородные связи [6]. Установлено [8], что при концентрациях водного раствора фуллеренола, близкой к его предельной растворимости в воде (58,9 мг/мл [9]), он имеет тенденцию формировать кластеры в матрице из ПВС, в результате чего композитный материал обнаруживает особенности, присущие чистому фуллеренолу. Определение концентрации фуллеренола, при которой начинают проявляться такие особенности, представляется важной задачей как в практическом, так и научном планах. Здесь следует отметить, что тенденция к образованию агрегатов молекул наблюдается не только в композитном материале ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$ , но и в фуллерене  $C_{60}$ , введенном в матрицу полиметилметакрилата (ПММА). Агрегаты, которые образуются при этом в ПММА, обладают определенной степенью упорядоченности, однако она далека, тем не менее, от упорядоченности кристаллической фазы [10]. По мнению авторов статьи [10], подобные явления связаны с сегрегацией молекул фуллерена в процессе образования пленки при испарении растворителя.

Целью настоящего исследования являлся анализ влияния на оптические свойства пленок ПВС добавки в них водного раствора фуллеренола  $C_{60}(OH)_{44}$  различной концентрации.



### Методика эксперимента

Объектами исследования в данной работе служили пленки, изготовленные из ПВС марки 16/1 (ГОСТ 10779-78). 5%-й водный раствор ПВС приготавливали посредством растворения ПВС в дистиллированной воде при температуре 85 °С. В полученный раствор ПВС добавляли водные растворы фуллеренола разной концентрации. При изготовлении композитных пленок использовался фуллеренол, синтезированный по методике, описанной в статье [11]. Композитные пленки изготавливали методом полива смеси на поверхность стекла (чашка Петри диаметром 9 см) с последующим высушиванием на воздухе при комнатной температуре. Было изготовлено 7 образцов композитной пленки ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  с различной концентрацией фуллеренола (см. таблицу) и один контрольный образец пленки ПВС без фуллеренола. После изготовления все пленки сначала выдерживали в термостате при температуре 120 °С в течение 2 ч, а затем они медленно охлаждались до комнатной температуры в течение 8 ч. Весь процесс термической обработки пленок производили в вакууме при давлении около 10 Па.

Таблица

#### Характеристика изготовленных образцов пленок ПВС+фуллеренол

Толщина, мкм	79±1	54±1	73±3	59±3	76±5	74±1	85±2	68±2
Концентрация фуллеренола, масс. %	0,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0	10,0

Оптические спектры пропускания пленок в диапазоне длин волн 190 – 1100 нм измеряли с помощью спектрофотометра СФ-56.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены оптические спектры пропускания  $T(\lambda)$  ( $T$  – коэффициент пропускания,  $\lambda$  – длина волны света) исследуемых пленок. Видно, что пленка ПВС без добавки фуллеренола характеризуется прозрачностью не только в видимой, но и в ближней ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Полосу, наблюдаемую в ПВС на длине волны 280 нм, можно отнести к образованию в полимере структур вида  $-CH=CH-)_2CO-$  [12].

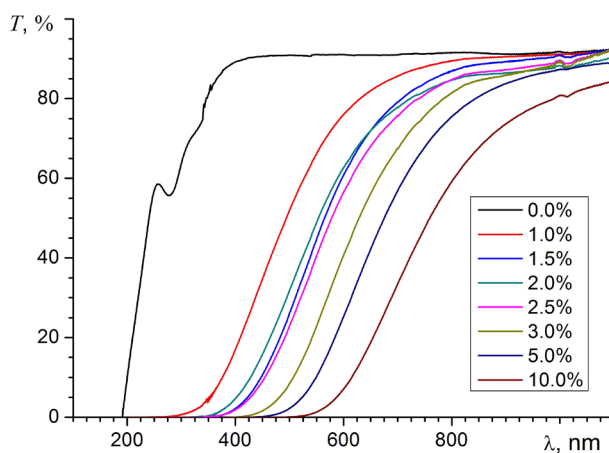


Рис. 1. Спектры пропускания образцов пленок чистого ПВС и композитов ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  при различной концентрации фуллеренола

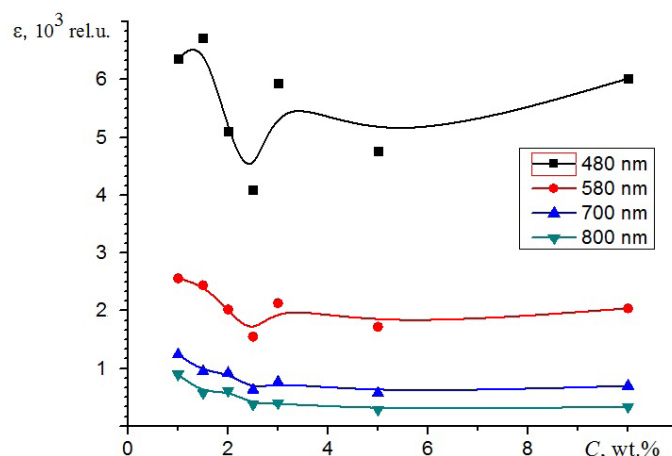


Рис. 2. Зависимости коэффициента экстинкции композитных пленок ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  от концентрации фуллеренола при различных значениях длины световой волны  $\lambda$

Добавка в ПВС даже небольшого количества фуллеренола приводит к окрашиванию пленки в желто-коричневый цвет и сопровождается значительным возрастанием поглощения света в УФ-области спектра. При этом на рассматриваемых зависимостях  $T(\lambda)$  отсутствуют какие-либо характерные полосы поглощения. Отметим, что возникновению желтой окраски полимерной пленки сопутствует появление поглощения в синей области спектра. По мере увеличения концентрации фуллеренола в композитной пленке ее цвет становится все более насыщенным, с преобладанием коричневых тонов, а граница пропускания все более и более смещается в длинноволновую область спектра.

При сравнении ослабления света композитными пленками ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  различной толщины рассмотрим влияние концентрации фуллеренола на их коэффициент экстинкции, определив его как

$$\varepsilon(\lambda) = -\lg[T(\lambda)]/lC, \quad (1)$$

где  $l$ , мкм, – толщина пленки;  $C$ , масс.%, – концентрация фуллеренола.

Зависимости  $\varepsilon(C)$  представлены на рис. 2. Они были рассчитаны с помощью соотношения (1) и зависимостей  $T(\lambda)$  для различных длин волн. Видно, что на длинах волн 700 и 800 нм эти кривые – гладкие, причем значения величины  $\varepsilon$ , найденные при меньших  $\lambda$ , несколько выше, чем на волнах большей длины. Следует отметить снижение коэффициента экстинкции при увеличении концентрации  $C_{60}(OH)_{44}$  с 1 до 3% и стабилизацию его значения при большей концентрации фуллеренола. Значения коэффициента, определенные на длинах волн 580 и 480 нм, характеризуются как существенно большими значениями коэффициента экстинкции, так и их значительным разбросом в интервале концентраций фуллеренола 2 – 3 %.

Мы полагаем, что наблюдаемая особенность кривой  $\varepsilon(C)$  при концентрации фуллеренола  $C = 2 - 3 \%$  вызвана концентрационно-зависимой агрегацией с образованием кластеров молекул фуллеренола. На начальной стадии формирования кластеров их размеры достаточно малы и по мере увеличения концентрации фуллеренола в растворе трансформируются случайным образом; поэтому коэффициент экстинкции, зависящий от размеров кластера, также изменяется случайным образом. По достижении определенной концентрации молекул фуллеренола можно говорить о некотором среднем размере кластеров, который уже не зависит или мало зависит от указанной концентрации при дальнейшем ее увеличении.

Помутнения пленок с повышением концентрации допанта визуально не наблюдалось. Это дает основание утверждать, что снижение интенсивности светового потока, проходящего сквозь пленку (а, следовательно, и величины коэффициента экстинкции  $\varepsilon$ ) связано с поглощением световой энергии, а не ее рассеянием в композитной пленке.



Для определения энергетического зазора между уровнями высшей занятой молекулярной орбитали (НОМО) и низшей незанятой МО (LUMO) в органических структурах (краткое название – «зазор НОМО – LUMO»), в том числе и в полимерных композитных материалах, часто используется следующее соотношение [5, 13 – 15]:

$$(hv/l) \cdot \ln(1/T) = B(hv - E_g)^p, \quad (2)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота световой волны;  $B$  – константа, не зависящая от энергии квантов света  $hv$ ;  $E_g$  – энергетический зазор НОМО – LUMO,  $E_g = E_{\text{LUMO}} - E_{\text{НОМО}}$  ( $E_{\text{НОМО}}$ ,  $E_{\text{LUMO}}$  – энергии уровней НОМО и LUMO соответственно);  $p$  – константа, определяющая характер оптического перехода НОМО  $\rightarrow$  LUMO (определяет фундаментальное поглощение).

При разрешенном прямом переходе значение  $p = 1/2$ , а при непрямом переходе, связанном с испусканием или поглощением фонона,  $p = 2$  [15].

Соотношение (2) определяет энергетический зазор на основании данных о коэффициенте пропускания  $T(\lambda)$ . Из него следует, что значение  $E_g$  можно найти через экстраполяцию линейной части графика

$$[(hv/l) \cdot \ln(1/T)]^{1/p} \quad (3)$$

к нулевому значению.

В работе [5] соотношение (2) было использовано для расчета  $E_g$  в пленках ПВС, модифицированного экстрактом из листьев черного чая. Авторы статьи [5] получили, что значение  $E_g$  при  $p = 1/2$  (т. е. в предположении о реализации прямых переходов) для чистого ПВС составило 5,38 эВ. При добавлении в водный раствор, содержащий 1 г ПВС, 10 мл экстракта чая величина  $E_g$  снизилась до 3,1 эВ и в дальнейшем уменьшалась по мере увеличения объема добавляемого экстракта. При добавлении 60 мл экстракта значение  $E_g$  составило 1,85 эВ. По мнению авторов статьи [5], раствор чайного экстракта содержит достаточное количество сопряженных двойных связей, гидроксильных, карбоксильных групп, полифенолов и конъюгатов полифенолов, которые способствуют образованию комплексов с полярными группами ПВС, что и приводит к снижению величины  $E_g$  для молекул ПВС.

Тенденция к снижению величины  $E_g$  при добавлении в ПВС иодида натрия NaI была установлена и в работе [15]. Оценки величины  $E_g$  с использованием соотношения (2) в этой работе были выполнены в предположении о возможности как прямых, так и не прямых переходов. Для чистого ПВС значение  $E_g$ , определенное при  $p_1 = 1/2$ , составляло 5,4 эВ, а при  $p_2 = 2$  составляло 4,9 эВ. Для композитной пленки ПВС : NaI (90 : 10) авторы получили значения 5,10 и 4,65 эВ соответственно, а при увеличении концентрации NaI в композите ПВС : NaI (70 : 30) значение  $E_g$  уменьшилось до 4,90 эВ для прямых переходов и до 4,40 эВ для не прямых.

Таким образом, увеличение концентрации допанта в ПВС всегда сопровождается снижением значения  $E_g$ , определяемого по формуле (2).

В настоящей работе на основании спектров светопропускания чистого ПВС и композитных пленок ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  с разной концентрацией фуллеренола были рассчитаны величины  $E_g$  в предположении о возможности как прямых, так и не прямых переходов.

На рис. 3 в качестве примера представлены расчетные зависимости величин  $[(hv/l) \cdot \ln(1/T)]^2$  и  $[(hv/l) \cdot \ln(1/T)]^{1/2}$  (см. формулу (3)) от энергии квантов света  $hv$  (рис. 3, а и б, соответственно) для чистого ПВС и продемонстрировано определение  $E_g$  для этого полимера. Для прямых переходов полученное значение  $E_g$  составило  $5,7 \pm 0,2$  эВ (здесь и далее наличие ошибки при определении  $E_g$  обусловлено выбором числа точек при линейной экстраполяции), а для не прямых –  $5,6 \pm 0,2$  эВ.

В пределах погрешности значения  $E_g$  оказываются практически идентичными, поэтому их нельзя использовать для обоснования выбора доминирующего перехода. Вместе с тем, полученные значения  $E_g$  хорошо согласуются с известными из литературы данными о разрыве НОМО – LUMO в ПВС [5, 15].

Аналогичным способом были найдены значения  $E_g$  в пленках ПВС, допированных фуллеренолом, но вследствие ограниченного числа точек, по которым осуществлялась



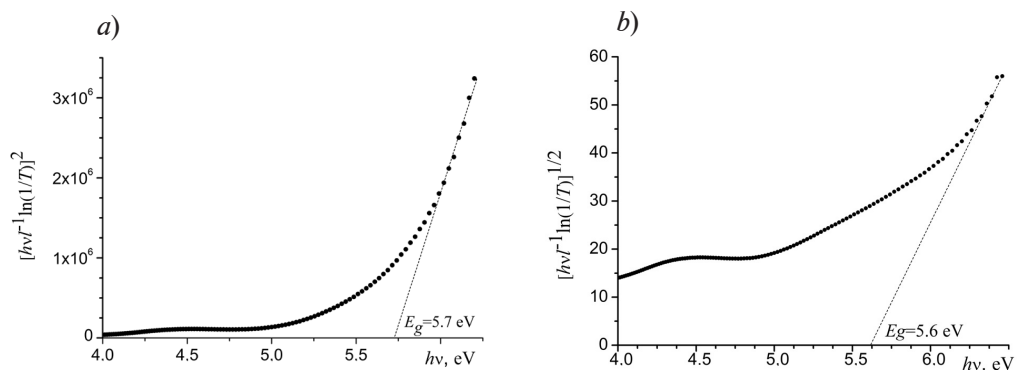


Рис. 3. Пример расчетных зависимостей величины (3) при значениях  $p_1 = 1/2$  (a) и  $p_2 = 2$  (b) для пленки из чистого поливинилового спирта. Точечные касательные прямые показывают способ нахождения значений  $E_g$

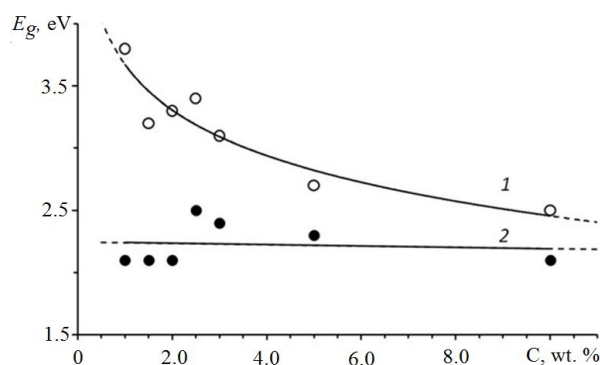


Рис. 4. Расчетные зависимости разрыва НОМО–LUMO в композитных пленках ПВС от концентрации фуллеренола для прямых (1) и непрямых (2) типов переходов НОМО→LUMO. Данные получены на основе экспериментов по оптическому пропусканию образцов

линейная аппроксимация, погрешность при определении  $E_g$  возросла до  $\pm 0,3$  эВ.

Зависимость  $E_g$  от концентрации фуллеренола в композитных пленках ПВС:  $C_{60}(OH)_{44}$  в предположении о возможности реализации как прямых, так и непрямых переходов НОМО → LUMO представлена на рис. 4.

Видно, что значения  $E_g$ , определенные в предположении о двух типах переходов, существенно различаются по величине, что особенно заметно при значениях концентрации допанта ниже 5%. Вместе с тем, вне зависимости от предполагаемого типа перехода, полученные значения  $E_g$  для композитного материала существенно ниже такового, найденного для чистого ПВС. Если величины  $E_g$ , найденные для прямых переходов, обнаруживают тенденцию к снижению при повышении концентрации фуллеренола,

то для непрямых переходов такого поведения зависимости не наблюдается и величины  $E_g$  примерно одинаковы при всех концентрациях допанта.

Прежде чем перейти к дальнейшему анализу результатов, представленных на рис. 4, отметим, что ПВС представляет собой молекулярную твердую субстанцию, образованную посредством водородных (слабых) межмолекулярных связей, поэтому макромолекулы ПВС в конденсированной фазе сохраняют свою индивидуальность. При изготовлении композитных пленок ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  мы брали смесь водных растворов ПВС и фуллеренола и не применяли каких-либо специальных методов, которые бы инициировали сшивку макромолекул, поэтому между молекулами ПВС и фуллеренола не могло возникнуть сильных ковалентных связей [6]. В нашем случае между молекулами доминируют водородные связи, которые значительно слабее ковалентных и не способны существенным образом трансформировать электронную структуру как молекул ПВС, так и фуллеренола. Как следствие этого, положение энергетических уровней НОМО и LUMO, определяющих величину  $E_g$ , сохраняется неизменным. Во всяком случае, снижение величины  $E_g$  молекул ПВС при их взаимодействии с молекулами фуллеренола не должно быть столь значительным, как это следует из данных на рис. 4 для прямых переходов НОМО → LUMO.

По нашему мнению, поглощение света композитными пленками ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  не связано с возбуждением молекул ПВС, обладающих модифицированной электронной структурой ввиду их взаимодействия с молекулами допантов, а вызвано непрямыми переходами НОМО → LUMO в молекулах фуллеренола, для которых значение  $E_g$  составляет примерно 2,2 эВ и мало зависит от концентрации допанта.



К сожалению, в литературе отсутствуют какие-либо данные об электронной структуре фуллеренола  $C_{60}(OH)_{44}$ , но известны результаты теоретических расчетов электронного спектра и оценки величины  $E_g$  для фуллеренола с меньшим числом гидроксильных групп ( $C_{60}(OH)_{26}$ ), для которого значение  $E_g$  было определено равным около 1,95 эВ [16]. Для изолированной молекулы фуллерена  $C_{60}$  величина щели запрещенных энергий (зазор НОМО – LUMO) составляет 1,9 эВ [17], что в пределах погрешности измерений совпадает с величиной  $E_g$ , определенной нами в данной работе.

### Заключение

В настоящей работе представлены результаты измерений поглощения света пленками ПВС, допированными молекулами фуллеренола  $C_{60}(OH)_{44}$ . Установлено, что добавка даже небольшой концентрации фуллеренола приводит к значительному поглощению света в УФ-области спектра. По мере увеличения концентрации фуллеренола от 1 до 10 масс.% граница пропускания света композитных пленок ПВС :  $C_{60}(OH)_{44}$  смещается от 230 к 440 нм. При увеличении концентрации фуллеренола от 1 до 3% коэффициент экстинкции снижается, и при больших концентрациях допанта остается практически неизменным. Можно предположить, что молекулы фуллеренола образуют кластеры и, начиная с некоторого размера кластеров (он должен увеличиваться по мере роста концентрации допанта), величина зазора НОМО – LUMO ( $E_g$ ) молекул фуллеренола в кластерах практически перестает изменяться и становится близкой к соответствующим значениям в конденсированном состоянии; другими словами, величина коэффициента экстинкции стабилизируется и прекращает возрастать при увеличении концентрации допанта, несмотря на продолжающийся рост размеров кластеров.

Поглощение света в изученных композитных пленках скорее всего связано с возбуждением молекул фуллеренола при непрямах переходах НОМО → LUMO. Значение зазора НОМО – LUMO  $E_g$ , найденное на основании измеренных спектров пропускания образцов пленок, составляет  $2,2 \pm 0,3$  эВ, согласно нашей оценке, и мало зависит от концентрации фуллеренола в композитной пленке.

### Благодарность

Авторы выражают глубокую признательность Татьяне Фёдоровне Ивановой, ведущему специалисту Высшей школы электроники и микросистемной техники СПбПУ Петра Великого, за помощь в изготовлении образцов полимерных пленок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенберг М. Э. Полимеры на основе винилацетата. Ленинград: Химия, 1983. 176 с.
2. Nawaz A., Hümmelgen I. A. Poly (vinyl alcohol) gate dielectric in organic field-effect transistors // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2019. Vol. 30. No. 6. Pp. 5299–5326.
3. 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.
4. Смирнов Ю. Н., Арбузов А. А., Штефан И. Н., Лесничая В. А., Мурадян В. Е. Полимерные аппреты, содержащие водорастворимые производные фуллерена // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84. № 10. С. 1729–1733.
5. Aziz S. B. Modifying poly (vinyl alcohol) (PVA) from insulator to small-bandgap polymer: A novel approach for organic solar cells and optoelectronic devices // Journal of Electronic Materials. 2016. Vol. 45. No. 1. Pp. 736–745.
6. Пенькова А. В., Пиотровский Л. Б., Маркелов Д. А., Семисалова А. С. Производные фуллерена как нанодобавки для полимерных композитов // Успехи химии. 2017. Т. 86. № 6. С. 530–566.
7. Никитина Е. А., Капралова В. М., Сударь Н. Т., Студзинский В. М., Герасимов В. И. Электрические и оптические свойства нанокомпозитного материала на основе поливинилового спирта и фуллеренола // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 3. С. 76–86.

8. Карпунин А. Е. Радиоспектроскопические и оптические исследования структуры, сформированной фуллеренолом в полимерной матрице // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. Санкт-Петербург, 19 – 24 ноября 2018 г. С. 91–93.
9. Kokubo K., Matsubayashi K., Tategaki H., Takada H., Oshima T. Facile synthesis of highly water-soluble fullerenes more than half-covered by hydroxyl groups // ACS Nano. 2008. Vol. 2. No. 2. Pp. 327–333.
10. Гинзбург Б. М., Меленевская Е. Ю., Новоселова А. В., Поздняков А. О., Поздняков О. Ф., Редков Б. П., Ширияева О. А. Структура фуллерена  $C_{60}$  в матрице полиметилметакрилата // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2004. Т. 46. № 2. С. 295–303.
11. Kratschmer W., Lamb L. D., Fostiropoulos K., Huffman D. R. Solid  $C_{60}$ : a new form of carbon // Nature. 1990. Vol. 347. 27 September. Pp. 354–358.
12. Сперанская Т. А., Тарутина Л. И. Оптические свойства полимеров. Л.: Химия, 1976. 136 с.
13. Aziz S. B., Hussein S., Hussein A. M., Saeed S. R. Optical characteristics of polystyrene based solid polymer composites: Effect of metallic copper powder // International Journal of Metals. 2013. Vol. 1. 12 December. P. 123657.
14. Yakuphanoglu F., Sekerci M., Balaban A. The effect of film thickness on the optical absorption edge and optical constants of the Cr (III) organic thin films // Optical Materials. 2005. Vol. 27. No. 8. Pp. 1369–1372.
15. Bhargav P. B., Mohan V. M., Sharma A. K., Rao V. N. Structural, electrical and optical characterization of pure and doped poly (vinyl alcohol)(PVA) polymer electrolyte films // International Journal of Polymeric Materials. 2007. Vol. 56. No. 6. Pp. 579–591.
16. Guirado-Lopez R. A., Rincyn M. E. Structural and optical properties of highly hydroxylated fullerenes: Stability of molecular domains on the  $C_{60}$  surface // The Journal of Chemical Physics. 2006. Vol. 125. No. 15. P. 154312.
17. Макарова Т. Л., Захарова И. Б. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов // Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 2001. 72 с.

## REFERENCES

1. Rozenberg M. E., Polimery na osnove vinilatsetata [Polymers based on vinyl acetate], Khimiya Publishing, Leningrad, 1983 (in Russian).
2. Nawaz A., Hümmelgen I. A., Poly (vinyl alcohol) gate dielectric in organic field-effect transistors, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 30 (6) (2019) 5299–5326.
3. Likhomanova S. V., Zubtsova Yu. A., Kamanina N. V., Polarization properties of iodine-polyvinyl alcohol polarizers sensitized with graphene oxide, J. Opt. Technol. 90 (7) (2023) 101–106.
4. Smirnov Y. N., Arbuzov A. A., Shtefan I. N., et al., Polymeric dressing formulations containing water-soluble fullerene derivatives, Russ. J. Appl. Chem. 84 (10) (2011) 1821–1825.
5. Aziz S. B., Modifying poly (vinyl alcohol) (PVA) from insulator to small-bandgap polymer: A novel approach for organic solar cells and optoelectronic devices, J. Electron. Mater. 45 (1) (2016) 736–745.
6. Penkova A. V., Markelov D. A., Acquah S. F., et al., Fullerene derivatives as nano-additives in polymer composites, Russ. Chem. Rev. 86 (6) (2017) 530–566.
7. Nikitina E. A., Kapralova V. M., Sudar N. T., et al., Electrical and optical properties of a nanocomposite based on polyvinyl alcohol and fullereneol, St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. 74 (3) (2024) 76–86 (in Russian).
8. Karpunin A. E., Radiospektroskopicheskiye i opticheskiye issledovaniya struktury, sformirovannoy fullerlenolom v polimernoy matritse [Radiospectroscopic and optical studies of structure formed by fullereneol in the polymeric matrix], Science Week in SPbPU. Proc. Sci. Conf. with Int. Participation, Institute of Physics, Nanotechnology and Telecommunications, Nov. 19–24, 2018, St. Petersburg (2018) 91–93 (in Russian).
9. Kokubo K., Matsubayashi K., Tategaki H., et al., Facile synthesis of highly water-soluble fullerenes more than half-covered by hydroxyl groups, ACS Nano. 2 (2) (2008) 327–333.
10. Ginzburg B. M., Pozdnyakov A. O., Shepelevskii A. A., et al., Structure of fullerene  $C_{60}$  in a poly(methyl methacrylate) matrix, Polymer Sci. 46 (2) (2004) 169–175.





11. Kratschmer W., Lamb L. D., Fostiropoulos K., Huffman D. R., Solid C<sub>60</sub>: a new form of carbon, Nature. 347 (27 Sept) (1990) 354–358.
12. Speranskaya T. A., Tarutina L. I., Opticheskiye svoystva polimerov [Optical properties of polymers], Khimiya Publishing, Leningrad, 1976 (in Russian).
13. Aziz S. B., Hussein S., Hussein A. M., Saeed S. R., Optical characteristics of polystyrene based solid polymer composites: Effect of metallic copper powder. Int. J. Met. 1 (12 Dec) (2013) 123657.
14. Yakuphanoglu F., Sekerci M., Balaban A., The effect of film thickness on the optical absorption edge and optical constants of the Cr (III) organic thin films, Opt. Mater. 27 (8) (2005) 1369–1372.
15. Bhargav P. B., Mohan V. M., Sharma A. K., Rao V. N., Structural, electrical and optical characterization of pure and doped poly (vinyl alcohol)(PVA) polymer electrolyte films, Int. J. Polym. Mater. 56 (6) (2007) 579–591.
16. Guirado-Lopez R. A., Rincyn M. E., Structural and optical properties of highly hydroxylated fullerenes: stability of molecular domains on the C<sub>60</sub> surface, J. Chem. Phys. 125 (15) (2006) 154312.
17. Makarova T. L., Zakharova I. B., Elektronnaya struktura fullerenov i fulleritov [Electronic structure of fullerenes and fullerites], Nauka Publishing. Leningrad branch, Leningrad, 2001 (in Russian).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НИКИТИНА Елизавета Александровна** — аспирантка Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

eanikitina26@icloud.com

ORCID: 0000-0003-1394-2681

**КАПРАЛОВА Виктория Маратовна** — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

kapralova2006@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9050-4453

**СУДАРЬ Николай Тобисович** — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

sudar53@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7380-7727

**ГЕРАСИМОВ Виктор Иванович** — кандидат технических наук, доцент Высшей школы механики и процессов управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

viger53@rambler.ru

ORCID: 0009-0004-2167-0019

**УТАЕВ Собир Ачилович** — доктор философии (PhD) по техническим наукам, заведующий кафедрой промышленной инженерии Каршинского государственного университета, г. Карши, Узбекистан.

180103, Узбекистан, г. Карши, ул. Кучабаг, 17

utaev.s@list.ru

ORCID: 0000-0003-0377-8929

## THE AUTHORS

**NIKITINA Elizaveta A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
eanikitina26@icloud.com  
ORCID: 0000-0003-1394-2681

**KAPRALOVA Viktoria M.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
kapralova2006@yandex.ru  
ORCID: 0000-0001-9050-4453

**SUDAR Nicolay T.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
sudar53@mail.ru  
ORCID: 0000-0001-7380-7727

**GERASIMOV Viktor I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
viger53@rambler.ru  
ORCID: 0009-0004-2167-0019

**UTAEV Sobir A.**

*Karshi State University*  
17 Kuchabog St., Karshi, 180103, Uzbekistan  
utaev.s@list.ru  
ORCID: 0000-0003-0377-8929

*Статья поступила в редакцию 10.06.2022. Одобрена после рецензирования 08.07.2022.  
Принята 08.07.2022.*

*Received 10.06.2022. Approved after reviewing 08.07.2022. Accepted 08.07.2022.*