

14,13

## Фотофизические свойства тонких пленок перилена, модифицированного функциональными группами диангидрида и диимида тетракарбоновой кислоты

© А.С. Комолов<sup>1</sup>, Э.Ф. Лазнева<sup>1</sup>, Е.В. Жижин<sup>1</sup>, Э.К. Алиджанов<sup>2</sup>, Ю.Д. Лантух<sup>2</sup>, С.Н. Летута<sup>2</sup>, Д.А. Раздобреев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

E-mail: a.komolov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 19 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принятая публикация 26 апреля 2021 г.

Методом атомно-силовой микроскопии исследована морфология пленок органических полупроводников диангидрида перилентетракарбоновой кислоты (PTCDA) и дибензил-диимида перилентетракарбоновой кислоты (N,N'-DBPTCDI) сформированных вакуумным термическим напылением. Показано, что отжиг пленок при 420 К приводит к перестройке их структуры и кристаллизации. На основе полученных спектров оптического поглощения исследуемых пленок оценена оптическая ширина запрещенной зоны. Установлена температурная зависимость темновой проводимости пленок PTCDA и N,N'-DBPTCDI до и после отжига ( $T = 420$  К). Определены значения энергии активации ловушек носителей заряда. Проведено моделирование структуры плотности локализованных в запрещенной зоне состояний исследуемых пленок по спектрам фотопроводимости в режиме постоянного фототока. Сформированы модельные фотовольтаические ячейки на основе PTCDA/CuPc и N,N'-DBPTCDI/CuPc-структур. Измерена кинетика затухания вентильной фотоэдс фотовольтаических ячеек при импульсном световом возбуждении. На основе выполненных измерений дана оценка подвижности носителей заряда в исследуемых полупроводниковых материалах.

**Ключевые слова:** сопряженные органические молекулы, производные перилена, тонкие пленки, фотоэлектрические свойства, температурная зависимость электропроводности, подвижность носителей заряда.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51281.091

### 1. Введение

Изучение фотофизических характеристик органических материалов перспективно в плане разработки новых фотовольтаических устройств. Одним из преимуществ органических материалов является возможность настраивать оптические и электрофизические свойства путем модификации структуры как отдельных молекул, так и материала в целом [1–3]. Модификацию электронных свойств тонкопленочных органических материалов можно проводить путем воздействия со стороны поверхности металлической или полупроводниковой подложки [4,5] и путем введения в состав органических молекул электроактивных функциональных групп, таких как карбоксильные, азотосодержащие, фторосодержащие [6–8]. Для создания эффективных элементов органических фотовольтаических ячеек, светодиодов важно выбрать подходящую донорно-акцепторную пару, обеспечивающую высокую степень разделения зарядов. Электронно-акцепторные материалы, такие как производные фуллеренов, тетрацианохинодиметан характеризуются хорошими электронно-акцепторными и транспортными свойствами [9]. Однако эти материалы обладают низким

коэффициентом поглощения света в видимой и ближней ИК-области. Использование в органических солнечных элементах материалов  $n$ -типа на основе диимид замещенного перилена привлекательно из-за их высокого молярного коэффициента экстинкции в сочетании с хорошими электронно-транспортными свойствами. Кроме того,  $\pi$ - $\pi$ -стэкинг в этих системах способствует эффективному межмолекулярному переносу заряда, и  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействия являются важным фактором процесса молекулярной самосборки [10,11].

В настоящей работе приведены результаты сравнительного исследования оптических, электронных, и структурных свойств тонких пленок, сформированных из полиароматических соединений диангидрида перилентетракарбоновой кислоты (3,4,9,10-perylenetetra-carboxylic acid dianhydride, PTCDA) и дибензилдиимид-перилентетракарбоновой кислоты (N,N'-dibenzyl-perylene-tetra-carboxylic acid diimide, N,N'-DBPTCDI). PTCDA широко используется в качестве электронно-акцепторного материала в устройствах молекулярной электроники, и его свойства достаточно хорошо изучены [12]. N,N'-DBPTCDI привлекает интерес как одна из перспективных модификаций молекулы PTCDA (рис. 1).

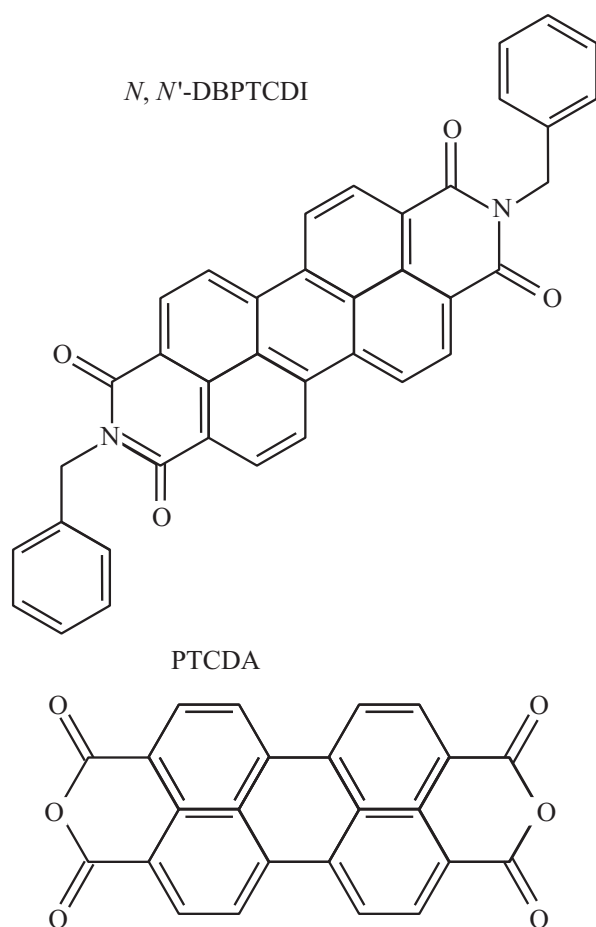


Рис. 1. Молекулярная структура исследуемых соединений.

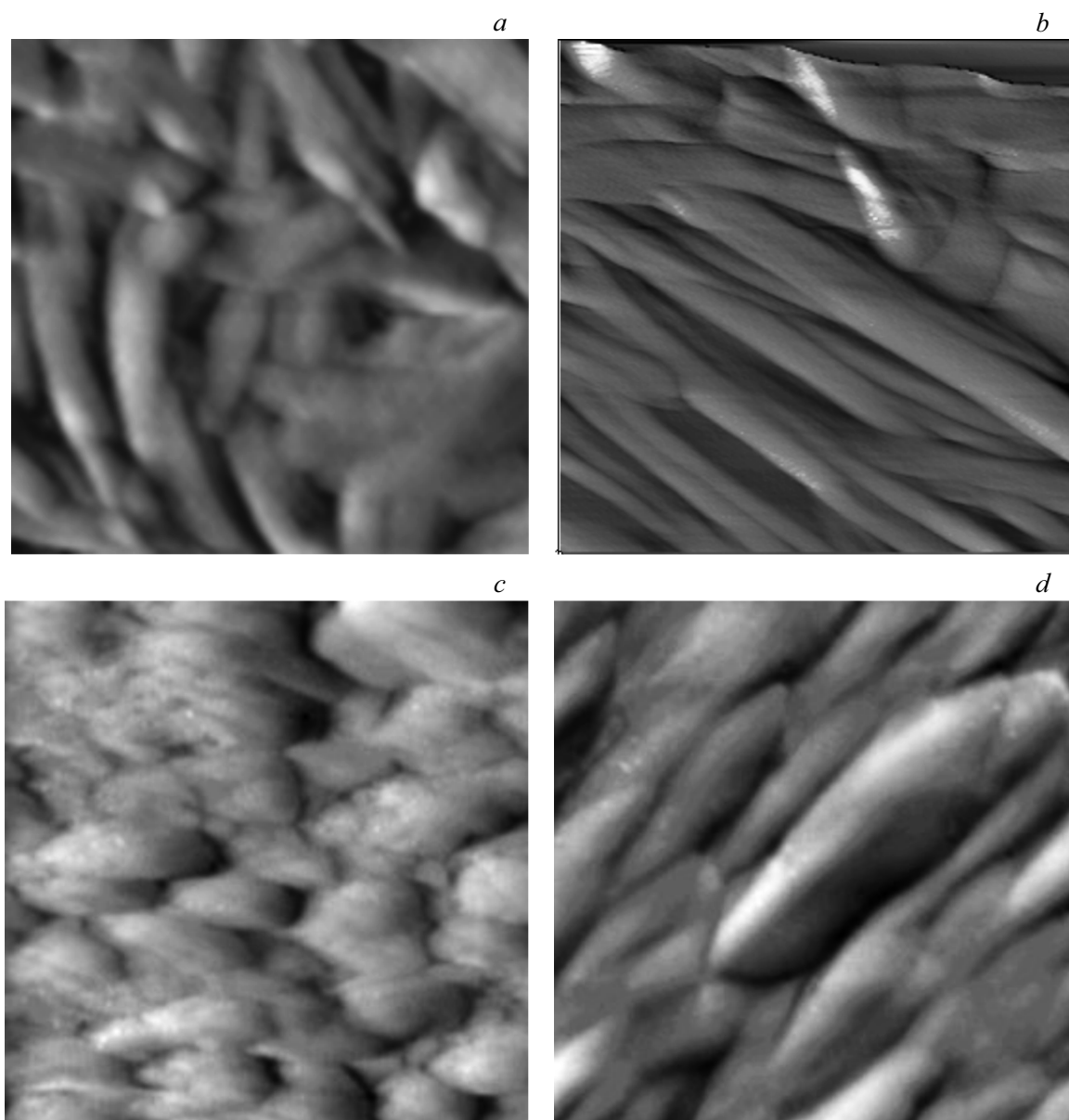
## 2. Эксперимент

Пленки исследованных материалов, PТCDA и *N,N'*-DBPТCDI, толщиной порядка  $1\ \mu\text{m}$ , формировали путем вакуумного напыления органического вещества при давлении  $10^{-5}\ \text{Pa}$  из ячейки Кнудсена на поверхность кварцевого стекла со скоростью  $2\text{--}3\ \text{nm}/\text{min}$ . Температура ячейки испарителя составляла  $600\ \text{K}$ , что обеспечивало испарение органических молекул без нарушения их стехиометрии [9]. Температуру подложки поддерживали на уровне комнатной. Толщину пленки контролировали интерференционным методом *in situ*. Подложки из кварцевого стекла предварительно промывали в ацетоне, спирте и кипятили в дистиллированной воде. Диагностику атомного состава сформированных пленок проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS). Для этого использовали комплексный фотоэлектронный спектрометр Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific Inc.). Исследования проводили в условиях сверхвысокого вакуума порядка  $10^{-7}\ \text{Pa}$  при комнатной температуре. В случае использования системы компенсации заряда парциальное давление аргона в аналитической камере составляло  $10^{-5}\ \text{Pa}$ . Энергия

возбуждающих фотонов составляла  $1486.6\ \text{eV}$ , спектры остовных уровней были измерены при энергии пропускания анализатора  $20\ \text{eV}$ . При анализе измеренных XPS-спектров использовали библиотеку стандартных XPS-спектров производителя оборудования (Thermo Fisher Scientific Inc.), включающую атомные факторы чувствительности регистрации сигнала. Диагностика атомного состава методом XPS была направлена на установление относительных концентраций основных атомных компонент пленок PТCDA и *N,N'*-DBPТCDI, то есть атомов C, O и N. С целью устранения возможных поверхностных загрязнений проводили предварительную очистку поверхности образца методом бомбардировки ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией  $3\ \text{keV}$ , что описано более подробно в работе [13]. В XPS-спектрах отчетливо наблюдались максимумы атомных компонент C1s, O1s и N1s. Измеренное соотношение концентраций атомов C:O составило  $28:6$  в случае пленки PТCDA. При измерениях состава пенки *N,N'*-DBPТCDI соотношение концентраций атомов C:O:N составило  $44:4:2$ . Такие измеренные значения относительных атомных концентраций соответствует незначительному, примерно 10% превышению содержания атомов C в исследованных образцах, по сравнению с химической формулой исследованных молекул (рис. 1).

Морфологию и толщину напыляемых пленок контролировали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью сканирующего зондового микроскопа СММ 2000Т. Для измерения темновой проводимости на кварцевой подложке  $2 \times 2\ \text{cm}$  методом термического напыления формировалась пленка *N,N'*-DBPТCDI (PТCDA) толщиной  $500\ \text{nm}$ . Далее через маску с зазором  $1\ \text{mm}$  напыляли серебряные токоподводящие электроды. Образец помещали на специальный держатель, снабженный нагревателем и термпарой. Ток темновой проводимости регистрировался с помощью электрометрического усилителя при приложенном напряжении  $10\ \text{V}$ . Спектры электронного поглощения регистрировали на спектро-флуориметре СМ 2203. Спектральные зависимости фотопроводимости органических пленок в режиме постоянного фототока (СПФ) [14] измерялись на базе кафедры полупроводников МГУ.

На основе пленок исследуемых полупроводников и пленок фталоцианина меди (CuPc) формировали фотовольтаические ячейки Au/CuPc/PТCDA/Al и Au/CuPc/*N,N'*-DBPТCDI/Al. Для этого на поверхности кварцевого стекла, методом магнетронного напыления наносилась пленка золота прозрачностью 80%. Затем через маску, методом термического напыления, наносились последовательно пленки донорного полупроводника CuPc, акцепторного полупроводника PТCDA (*N,N'*-DBPТCDI) и слой алюминия. Оценка подвижности носителей заряда в исследуемых органических полупроводниках проводилась по кинетике затухания вентильной фотоэдс фотовольтаических ячеек при импульсном световом возбуждении.



**Рис. 2.** АСМ-изображение ( $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$ ) пленки N,N'-DBPTCDI (a) — до и (b) — после отжига. АСМ-изображение ( $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$ ) пленки PTCDA (c) — до и (d) — после отжига.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены изображения поверхности пленок исследуемых органических соединений, полученные методом атомно-силовой микроскопии. Изображения на рис. 2, a и c соответствуют исходным пленкам N,N'-DBPTCDI и PTCDA соответственно. На рис. 2, b и d показана морфология поверхности этих пленок в результате отжига при 420 К в вакууме при  $10^{-5}$  Па. Видно, что отжиг пленок при температуре 420 К сопровождается упорядочиванием их структуры. Согласно работе [9] при температуре 420 К происходит кристаллизация полиароматических соединений данного типа с формированием  $\pi$ - $\pi$ -стэкинг-структур.

На рис. 3 представлены спектры оптического поглощения пленок PTCDA и N,N'-DBPTCDI. Структура спектров двух соединений идентична с учетом bathochromного сдвига для N,N'-DBPTCDI на 0.1 eV. Известно, что исследуемые пленки обладают достаточно высоким значением коэффициента молярной экстинкции, порядка  $10^4 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , в области 500–600 nm. Возникновение тонкой структуры и наблюдаемые максимумы объясняются возбуждением серии электронно-колебательных  $\pi$ - $\pi^*$ -переходов и экситонных состояний [15].

Для пленок органических полупроводников характерно наличие как локализованных в запрещенной зоне электронных состояний, плотность которых экспоненциально спадает к ее середине [16], так и делокализо-

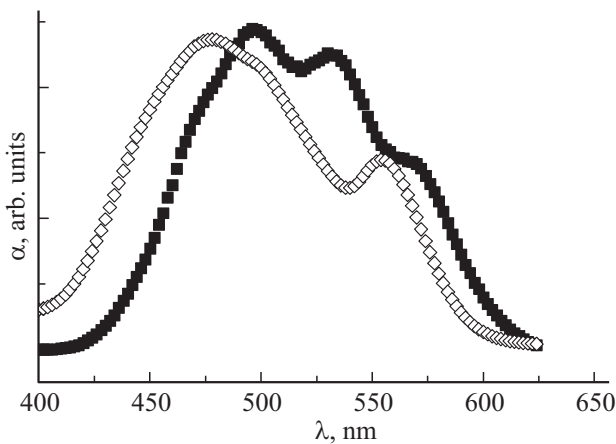


Рис. 3. Спектры оптического поглощения пленок PTCSA ( $\diamond$ ) и N,N-DBPTCDI ( $\blacksquare$ ).

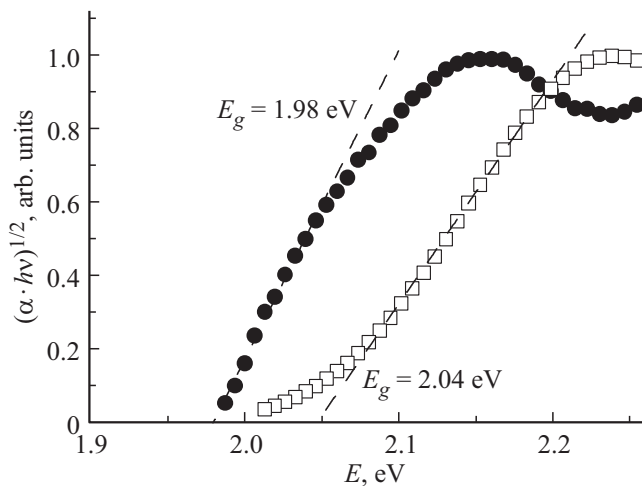


Рис. 4. Участок спектра оптического поглощения вблизи красной границы края поглощения пленок PTCSA ( $\square$ ) и пленок N,N-DBPTCDI ( $\bullet$ ). Пунктирные линии — аппроксимация участков экспериментально измеренных спектров для установления значений  $E_g$  исследованных пленок.

ванных электронных состояний. Оптические переходы с участием делокализованных состояний в органических полупроводниках формируют следующий вид спектральной зависимости коэффициента поглощения ( $\alpha$ ) от энергии падающего кванта ( $h\nu$ ) и оптической ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) в области длинноволновой границы полосы поглощения [17]:

$$\alpha \cdot h\nu \sim (h\nu - E_g)^2.$$

Таким образом, на основе экспериментально измеренных спектров поглощения пленок PTCSA и N,N-DBPTCDI была произведена оценка  $E_g$  этих материалов (рис. 4). Значения  $E_g$  составили  $2.04 \pm 0.2$  eV для пленки PTCSA и  $1.98 \pm 0.02$  eV для пленки N,N-DBPTCDI. Полученные значения оптической ширины запрещенной зоны исследованных пленок достаточно

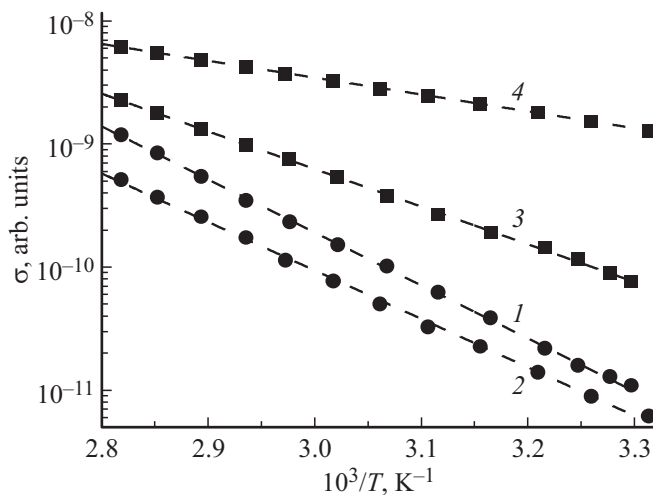
хорошо соответствуют литературным данным, полученным методами циклической вольт-амперометрии [1] и фотоэлектронной спектроскопии [11,18]. Незначительные расхождения в установленных различными экспериментальными методами значений, а также для пленок, сформированных различными группами исследователей, могут быть обусловлены влиянием поляризационных эффектов и формированием дипольного слоя на интерфейсе с подложкой [5,19]. Значение транспортной ширины запрещенной зоны может отличаться от ее оптической ширины на несколько десятых долей eV [19]. Так, согласно результатам работы [19] значения  $E_g$ , потенциала ионизации (IP) и средства к электрону ( $E_A$ ) составили 2.3, 6.4 и 4.1 eV, соответственно, для пленок PTCSA. Для пленок N,N-DBPTCDI значения этих величин составили 2.3, 6.3 и 4.0 eV соответственно.

С экспериментальной точки зрения особое внимание обычно уделяется температурной зависимости электропроводности, поскольку эта зависимость связана с механизмом транспорта заряда, а также содержит информацию о характере распределения плотности электронных состояний. В органических полупроводниках зависимость статической темновой проводимости от температуры ( $T$ ) имеет вид [20]:

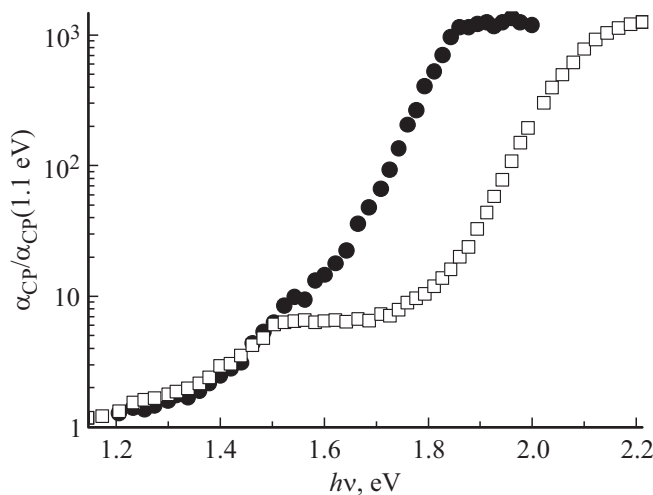
$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a(T)}{kT}\right)^\beta, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана, энергия активации проводимости ( $E_a$ ) представляет собой разницу значений энергии края зоны проводимости ( $E_C$ ) и  $E_F$ , предэкспоненциальный фактор  $\sigma_0$  зависит от базовых параметров системы, а показатель степени  $\beta$  зависит от структуры материала и температурного диапазона, в котором проводятся измерения проводимости. В органических неупорядоченных материалах значение  $\beta$  обычно близко к единице [20].

Транспорт носителей заряда в органических полупроводниках описывается механизмом множественного захвата ловушками [20], в которой рассматриваются только электронные переходы между локализованными состояниями в щели подвижности и делокализованными состояниями над краем подвижности. При этом большая часть носителей заряда оказываются захваченными ловушками, а перенос заряда осуществляется носителями, которые термически активируются в делокализованные состояния над краем подвижности. На рис. 5 приведены температурные зависимости проводимости пленок N,N'-DBPTCDI и PTCSA, построенные в полулгарифмическом масштабе для пленок в исходном состоянии и в состоянии после отжига при температуре 420 К. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются линейными функциями, по тангенсу угла наклона которых оценена энергия активации носителей согласно формуле (1). Для N,N'-DBPTCDI исходное значение  $E_a = 0.35$  eV, а после отжига  $E_a = 0.1$  eV. Для



**Рис. 5.** Температурная зависимость темновой проводимости пленок РТСДА до (кривая 1) и после (кривая 2) отжига и пленок N,N-ДВРТСДИ до (кривая 3) и после (кривая 4) отжига при температуре 420 К.



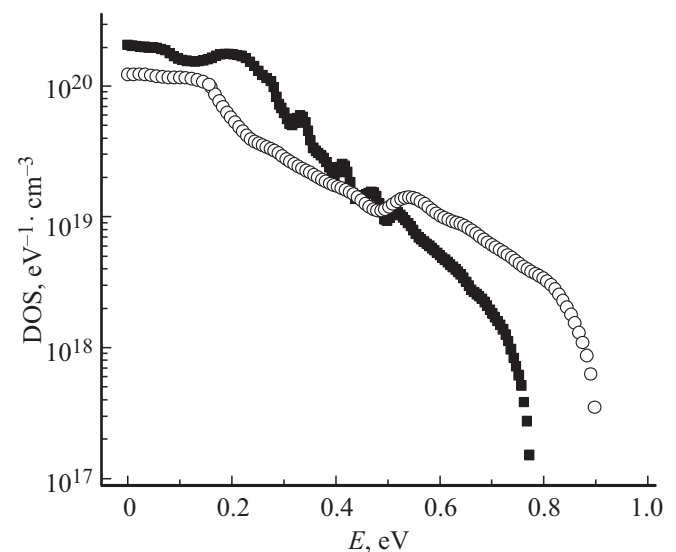
**Рис. 6.** Спектральные зависимости фототока постоянной величины  $\alpha_{CP}$ , нормированные на значение  $\alpha_{CP}$ , измеренное при 1.1 eV, для пленок N,N-ДВРТСДИ (●) и РТСДА (□).

РТСДА исходное значение  $E_a = 0.35$  eV, а после отжига  $E_a = 0.25$  eV. Таким образом, температурная зависимость проводимости исследованных пленок хорошо описывается выражением (1) с показателем степени  $\beta$ , близким по значению к 1. Изменение энергии активации после температурной обработки, вероятно, связано с процессом удаления глубоких ловушек при упорядочении структуры пленки.

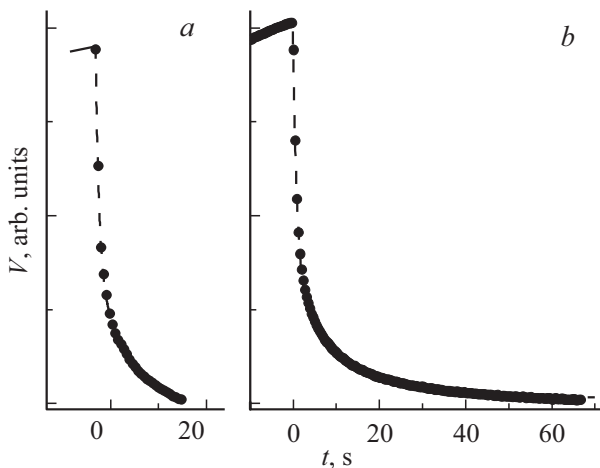
На рис. 6 представлены спектры фототока через пленки N,N-ДВРТСДИ и РТСДА в зависимости от энергии падающего кванта, измеренные методом постоянного фототока (СР, constant phototocurrent) [14] на краю полосы поглощения. Измеренные так спектральные зависимости  $\alpha_{CP}$  охватывают значительную часть спектра

локализованных в запрещенной зоне электронных состояний. Спектры СР (рис. 6) характеризуются наличием „плеча“ в области 1.5–1.8 eV. Поскольку в данном методе измеряется интенсивность зондирующего светового потока, обеспечивающего постоянство фототока через образец, формирование особенностей зависимости  $\alpha_{CP}$  означает, что распределение плотности  $N(E)$  локализованных электронных состояний исследованных образцов отличается от экспоненциальной зависимости. Можно показать, что спектр  $\alpha_{CP}$  представляет собой свертку  $N(E)$  в запрещенной зоне органического полупроводника и структуры плотности делокализованных состояний в зоне проводимости  $g(E)$ , которая пропорциональна  $(h\nu - E)^{0.5}$  [21]. Таким образом, по данным СР можно смоделировать структуру  $N(E)$  путем численного проведения операции обратной свертки. Нами использовался алгоритм численного расчета  $N(E)$  по спектрам СР, изложенный в работе [22]. Результаты таких расчетов для исследованных пленок N,N-ДВРТСДИ и РТСДА приведены на рис. 7. Нулевое значение шкалы энергий привязано к нижнему краю запрещенной зоны с учетом полученных значений ее оптической ширины. В случае пленки РТСДА (рис. 7, кружки) в области 0.5–0.6 eV заметен максимум плотности локализованных электронных состояний на краю запрещенной зоны. Переходы из этих локализованных состояний на край зоны подвижности инициированы квантами света  $h\nu = E_g - E_{loc}$  с энергией 1.5 eV, где  $E_{loc}$  — энергетическое положение локализованных электронных состояний относительно края запрещенной зоны.

Измерение нестационарной фотоэдс органических донорно-акцепторных систем [20,23], является эффективным инструментом изучения транспортных характеристик исследуемых органических материалов. С учетом



**Рис. 7.** Результаты расчета плотности локализованных состояний  $N(E)$  в запрещенной зоне N,N-ДВРТСДИ (■) и РТСДА (○) на основе спектров СР.



**Рис. 8.** Кинетические кривые затухания фотоэдс ячейки Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al — (a) и Au/CuPc/PTCDA/Al (b), полученные в вентильном режиме при импульсном световом возбуждении. На вставке — схематическое изображение ячейки Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al.

различия значений энергий HOMO (highest occupied molecular orbital) и LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) молекул CuPc и N,N-DBPTCDI [19] следует ожидать, что на интерфейсе CuPc/N,N-DBPTCDI возможно эффективное пространственное разделение экситонов на свободные электрон и дырку и возникновение фотоэдс до 0.5 eV. На рис. 8 приведены кинетические кривые вентильной фотоэдс фотовольтаических ячеек Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al и Au/CuPc/PTCDA/Al, полученные при импульсном световом возбуждении. Для ячейки Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al кинетическая кривая характеризуется меньшим значением времени затухания. В исследованных структурах в вентильном режиме напряженность электрического поля ( $E$ ) в слое органического гетероперехода определяется контактной разностью потенциалов между электродами порядка 1 V и толщиной пленки ( $D$ ), равной  $3 \mu\text{m}$ . Эффективную подвижность определяли как  $\mu = ED/\tau$ , где  $\tau$  — время спада фотоэдс в асимптоту.  $\tau$  оценивали путем аппроксимации кинетической кривой экспоненциальной зависимостью (рис. 8). Кинетические кривые на рис. 8 достаточно хорошо можно аппроксимировать суперпозицией двух экспонент с постоянной времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Наличие двух компонент обусловлено, вероятно, наличием электронного компонента и более медленного дырочного компонента фототока. Полученные значе-

Значения  $\tau$  и  $\mu$  исследованных фотовольтаических ячеек Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al и Au/CuPc/PTCDA/Al

Тип ячейки	$\tau_1, \text{s}$	$\mu_1, \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$\tau_2, \text{s}$	$\mu_2, \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
CuPc/NN-BDPTCDI	0.7	$1.29 \cdot 10^{-7}$	6.7	$7.69 \cdot 10^{-8}$
CuPc/PTCDA	1.4	$0.64 \cdot 10^{-7}$	11.5	$0.78 \cdot 10^{-8}$

ния  $\tau_{1,2}$  и  $\mu_{1,2}$  для ячеек Au/CuPc/NN-BDPTCDI/Al и Au/CuPc/PTCDA/Al сведены в таблицу. Полученные значения подвижности меньше значений подвижности, полученных времяпролетным методом [9] и методом полевого транзистора [24,25], что может быть обусловлено спецификой проведения измерений в воздушной среде [25].

#### 4. Заключение

Методом АСМ исследована морфология пленок органических полупроводников PTCDA и N,N-DBPTCDI, сформированных вакуумным термическим напылением. Показано, что отжиг пленок при 420 K приводит к перестройке их структуры и кристаллизации. Показано, что структура спектров оптического поглощения исследованных пленок идентична с учетом bathochromного сдвига для N,N-DBPTCDI на 0.1 eV. На основе спектров оптического поглощения дана оценка оптической ширины запрещенной зоны пленок PTCDA ( $E_g = 2.04 \text{ eV}$ ) и NN-DBPTCDI ( $E_g = 1.98 \text{ eV}$ ). Определена температурная зависимость темновой проводимости пленок PTCDA и N,N-DBPTCDI до и после отжига ( $T = 420 \text{ K}$ ). Получены значения энергии активации ловушек носителей заряда для PTCDA ( $E_a = 0.36 \text{ eV}$ , а после отжига  $E_a = 0.26 \text{ eV}$ ) и N,N-DBPTCDI ( $E_a = 0.35 \text{ eV}$ , а после отжига  $E_a = 0.12 \text{ eV}$ ). Измерены спектры фотопроводимости исследуемых пленок в режиме постоянного фототока в области края полосы поглощения. Смоделирована структура плотности локализованных в запрещенной зоне электронных состояний. Показано наличие выраженного максимума плотности локализованных состояний в пленке PTCDA в области 0.8 eV от края запрещенной зоны. Для пленки N,N-DBPTCDI такой максимум плотности локализованных состояний отсутствует. В структурах на основе PTCDA/CuPc и N,N-DBPTCDI/CuPc измерены кинетические зависимости затухания вентильной фотоэдс при импульсном световом возбуждении. Затухание фотоэдс описывается двумя экспоненциальными компонентами. Эффективные значения дрейфовой подвижности носителей заряда лежат составляют  $10^{-7} - 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ .

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (проект № FSGU-2020-0003). Диагностика атомного состава пленок выполнена при поддержке гранта РФФИ (20-03-00026). В работе использовали оборудование ресурсного центра „Физические методы исследования поверхности“ Научного парка СПбГУ.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] B.A. Jones, A. Facchetti, M.R. Wasielewski, T.J. Marks. *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 15259 (2007).
- [2] H. Bronstein, C.B. Nielsen, B.C. Schroeder, I. McCulloch. *Nature Rev. Chem.* **4**, 66 (2020).
- [3] A.N. Aleshin, P.S. Krylov, A.S. Berestennikov, I.P. Shcherbakov, V.N. Petrov, V.V. Kondratiev, S.N. Eliseeva. *Synth. Met.* **217**, 7 (2016).
- [4] И.А. Аверин, А.А. Карманов, В.А. Мошников, И.А. Пронин, С.Е. Игошина, А.П. Сигаев, Е.И. Теруков. *ФТТ* **57**, 2304 (2015).
- [5] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, Ю.А. Панина, А.В. Барамыгин, Г.Д. Зашихин, С.А. Пшеничнюк. *ФТТ* **58**, 367 (2016).
- [6] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, В.С. Соболев, С.А. Пшеничнюк, Н.Л. Асфандиаров, В.А. Крайкин, В. Handke. *ФТТ* **63**, 299 (2021).
- [7] A.S. Komolov, E.F. Lazneva, N.B. Gerasimova, Yu.A. Panina, V.S. Sobolev, A.V. Koroleva, S.A. Pshenichnyuk, N.L. Asfandiarov, A. Modelli, B. Handke, O.V. Borshchev, S.A. Ponomarenko. *J. Electron Spectr. Rel. Phenom.* **235**, 40 (2019).
- [8] A.Yu. Sosorev, M.K. Nuraliev, E.V. Feldman, D.R. Maslennikov, O.V. Borshchev, M.S. Skorotetcky, N.M. Surin, M.S. Kazantsev, S.A. Ponomarenko, D.Yu. Parashuk. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21**, 11578 (2019).
- [9] S. Vajiravelu, L. Ramunas, G.J. Vidas, G. Valentas, J. Vygin-tasc, S. Valiyaveettil. *J. Mater. Chem.* **19**, 4268 (2009).
- [10] Y.H. Zhou, Z.F. Yang, W.C. Wu, H.J. Xia, S.P. Wen, W.J. Tian. *Chin. Phys.* **16**, 2136 (2007).
- [11] M. Scholz, R. Schmidt, S. Krause, A. Schöll, F. Reinert, F. Würthner. *Appl. Phys. A* **95**, 285 (2009).
- [12] S. Günes, H. Neugebauer, N.S. Sariciftci. *Chem. Rev.* **107**, 1324 (2007).
- [13] A.S. Komolov, Y.M. Zhukov, E.F. Lazneva, A.N. Aleshin, S.A. Pshenichnyuk, N.B. Gerasimova, Yu.A. Panina, G.D. Zashikhin, A.V. Baramygin. *Mater. Des.* **113**, 319 (2017).
- [14] M. Vanecek, J. Kochka. *Solid State Commun.* **39**, 1199 (1981).
- [15] V. Bulovic, P.E. Burrows, S.R. Forrest, J.A. Cronin, M.E. Thompson. *Chem. Phys.* **210**, 1 (1996).
- [16] R.A. Street, K.W. Song, J.E. Northrup. *Phys. Rev. B* **83**, 165207 (2011).
- [17] J. Tauc. *Phys. Status Solidi* **15**, 627 (1996).
- [18] H. Yoshida. *J. Electron. Spectr. Rel. Phen.* **204**, 116 (2015).
- [19] S. Park, T.U. Kampen, D.R.T. Zahn. *Appl. Phys. Lett.* **79**, 4124 (2001).
- [20] H. Bassler, A. Kohler. *Top. Curr. Chem.* **312**, 1 (2012).
- [21] В.В. Малов, А.Г. Казанский, М.В. Хенкин, А.Р. Тамеев. *ПЖТФ* **40**, 22 (2014).
- [22] В.А. Лигачев, В.А. Филиков. *ФТП* **25**, 133, (1991).
- [23] L.J.A. Koster, M. Kemerink, M.M. Wienk, K. Maturova, R.A.J. Janssen. *Adv. Mater.* **23**, 1670 (2011).
- [24] V. Rani, A. Sharma, P. Kumar, B. Singh, S. Ghosh. *Royal Soc. Chem. Adv.* **7**, 54911 (2017).
- [25] K. Yamada, J. Takeya, T. Takenobu, Y. Iwasa. *Appl. Phys. Lett.* **92**, 253311 (2008).

Редактор К.В. Емцев