

14,03

Электронные состояния зоны проводимости ультратонких пленок тиофен-фенилен со-олигомера и замещенного бифенила на поверхности послойно выращенного ZnO

© А.С. Комолов¹, Э.Ф. Лазнева¹, Н.Б. Герасимова¹, В.С. Соболев¹, Е.В. Жижин¹, Д.А. Пудиков¹, С.А. Пшеничнюк², Н.Л. Асфандияров², О.В. Борщев³, С.А. Пономаренко³, В. Handke⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

³ Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

⁴ AGH University of Science and Technology, Faculty of Material Science and Ceramics, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

E-mail: a.komolov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 24 июня 2022 г.

В окончательной редакции 24 июня 2022 г.

Принята к публикации 28 июня 2022 г.

Приведены результаты исследования электронных состояний зоны проводимости и пограничного потенциального барьера при формировании ультратонких пленок тиофен-фениленового со-олигомера CH₃-фенилен-тиофен-фенилен-CH₃ (CH₃-PTTP-CH₃) на поверхности ZnO и пленок тетракарбоксильного диангида бифенила (Biphenyltetracarboxylic dianhydride, BPDA) на поверхности ZnO. Слой ZnO толщиной 100 nm приготовлен методом молекулярного наслаивания (atomic layer deposition, ALD). Органические пленки CH₃-PTTP-CH₃ и пленки BPDA толщиной до 8 nm формировали методом термического вакуумного осаждения. В процессе осаждения пленок проводили исследования электронных характеристик поверхности методом спектроскопии полного тока (TCS) в энергетическом диапазоне от 5 до 20 eV выше E_F. В этом энергетическом диапазоне установлена структура максимумов незаполненных электронных состояний пленок CH₃-PTTP-CH₃ и BPDA. В результате осаждения пленки CH₃-PTTP-CH₃ обнаружено снижение работы выхода до 4.0 eV, по сравнению со значением работы выхода 4.2 eV, измеренной для ALD ZnO-подложки. Это соответствует переносу отрицательного заряда из пленки CH₃-PTTP-CH₃ в подложку. Перенос заряда на границе пленки BPDA и ALD ZnO-подложки происходит в обратном направлении, так как при формировании этого пограничного барьера зарегистрировано увеличение работы выхода до 4.7 eV. Исследованные пленки CH₃-PTTP-CH₃ и BPDA и послойно выращенный ZnO представляют собой сплошное покрытие на достаточно больших участках поверхности порядка 10 μm × 10 μm. Шероховатость ZnO-поверхности не превышает 4 nm, а шероховатость поверхностей пленок CH₃-PTTP-CH₃ и BPDA составляет 10–15 nm.

Ключевые слова: тиофен-фениленовые со-олигомеры, тетракарбоксильный диангидрид бифенила, ультратонкие пленки, ZnO, метод молекулярного наслаивания (atomic layer deposition), электронные свойства, низкоэнергетическая электронная спектроскопия, пограничный потенциальный барьер.

DOI: 10.21883/FTT.2022.12.53663.415

1. Введение

Электронные свойства органических пленок на основе малых сопряженных органических молекул представляют значительный интерес в плане разработки активных элементов устройств органической электроники [1–5]. На основе тонких и сверхтонких пленок тиофен-фениленовых соолигомеров (TPCO) были сконструированы макеты органических полевых транзисторов (OFET) [6–9], и были продемонстрированы значения подвижности носителей заряда порядка 10⁻¹ cm²/(V·s) [9]. Было показано, что за счет присоединения электроактивных функциональных групп к

молекулам TPCO можно сформировать пленки TPCO *n*- и *p*-типа проводимости [6,7]. С помощью методики ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (UPS) установлены значения работы выхода некоторых видов пленок TPCO, установлено расположение характерных максимумов в валентной энергетической зоне [7,10]. Одним из методов оптимизации характеристик устройств органической электроники является использование гибридных (двухкомпонентных) материалов, либо использование нескольких слоев материалов на основе различающихся молекул [3,11,12]. В качестве электрон-акцепторного компонента в составе композита хорошо зарекомендовали себя пленки на основе

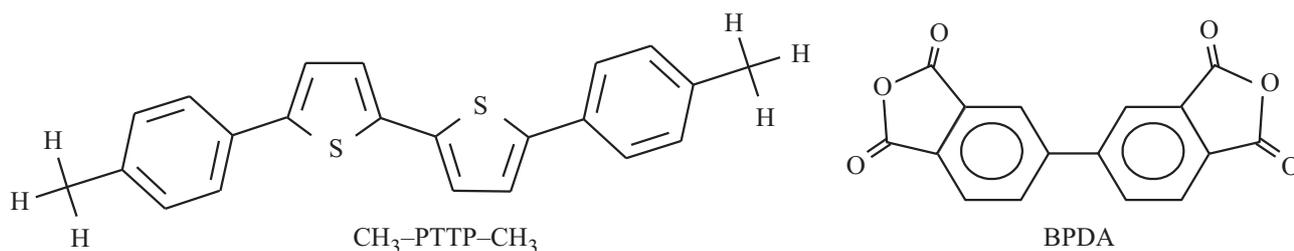


Рис. 1. Структурная формула молекул тиофен-фениленового со-олигомера 5, 5'-бис[4-метилфенил]-2, 2'-бифтиофена ($\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$) и тетракарбоксил диангида бифенила (Biphenyltetracarboxylic dianhydride, BPDA).

молекул замещенных периленов и нафталинов, такие как перилен-тетракарбонный диангидрид и нафталин-тетракарбонный диангидрид [13–15]. Для пленок этих молекул было показано, что именно введение функциональных групп диангида карбоновой кислоты приводит к понижению положения энергетических уровней, соответствующих энергетической зоне проводимости в этих материалах [16,17]. Пограничные структуры на основе полупроводниковых органических пленок и бинарных неорганических полупроводников, например, ZnO представляют интерес в плане использования в транзисторных и фотовольтаических устройствах [18–21]. Одним из хорошо контролируемых методов формирования (2D) неорганических полупроводников является метод молекулярного наслаивания (atomic layer deposition, ALD) [21–23]. С помощью ALD могут быть сформированы сплошные ZnO-покрытия исходной кремниевой подложки толщиной от нескольких nm до нескольких сотен nm.

Ранее нами были исследованы электронные состояния зоны проводимости пленок на основе бис-метилзамещенных и бис-трифторометилзамещенных молекул ТФСО на поверхности окисленного кремния и поликристаллического золота [24–26]. Проведены исследования пленок замещенных периленов и нафталинов с функциональными группами диангида карбоновой кислоты [27,28]. Измерения проводили методом спектроскопии полного тока (TCS), и было показано, что введение фторсодержащих функциональных групп и групп диангида карбоновой кислоты в состав молекул приводит к сдвигу максимумов плотности незаполненных электронных состояний (DOUS) в сторону меньших энергий электрона и к увеличению электронной работы выхода (work function) органического материала. Полученные методом TCS результаты хорошо соответствуют результатам, полученным с помощью других методик, такими как спектроскопия края поглощения рентгеновских лучей (NEXAFS) и спектроскопия электронного захвата [29,30]. В настоящей статье приведены результаты исследований электронных свойств структур на основе пленок диметил-замещенных тиофен-фениленовых со-олигомеров $\text{CH}_3\text{-фенилен-тиофен-тиофен-фенилен-CH}_3$ ($\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$) на поверхности ZnO и пленок

тетракарбоксового диангида бифенила (Biphenyltetracarboxylic dianhydride, BPDA) на поверхности ZnO. Подложки ZnO, приготовлены в ходе работы методом ALD. Приведены результаты исследования методом TCS-структуры незаполненных электронных состояний зоны проводимости и характеристики пограничного потенциального барьера между органическими пленками и ZnO-подложкой. Приведены результаты исследования топографии поверхности исследованных пленок методом микроскопии атомных сил (AFM).

2. Эксперимент

В качестве подложки для нанесения органических материалов использовали поверхность полупроводника ZnO, приготовленную методом молекулярного наслаивания (atomic layer deposition, ALD). Для синтеза использовали реагенты диэтилцинк и деионизированную воду. Температуру во время синтеза поддерживали в интервале 200–250°C и производили поочередное нанесение слоев атомов O и Zn на поверхность кремниевой подложки [31]. С учетом нанесенного количества слоев оценочная толщина пленок ZnO составила 100 nm. Ранее методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в составе сформированных слоев ZnO нами было установлено преобладание содержания атомов O на 5–10%, по сравнению с содержанием атомов Zn [23]. С помощью методики дифракции рентгеновских лучей установлено, что структура сформированного ZnO-покрытий соответствует структуре типа Вюрцита (Wurtzite), а шероховатость поверхности подложки не превышает 4 nm [23]. Приготовленные методом ALD ZnO-покрытия имеют ширину запрещенной зоны 3.4 eV, т.е. значения, характерные для этих полупроводниковых материалов [21]. Для приготовления пленок тиофен-фениленового со-олигомера использовали $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ (рис. 1), который синтезировали по ранее описанной методике [2]. Тетракарбоксил диангидрид бифенила (3, 3', 4, 4'-Biphenyltetracarboxylic dianhydride, BPDA) (рис. 1) был приобретен в Sigma-Aldrich. Обезгаживание материалов проводили путем выдерживания в вакууме при базовом давлении 10^{-6} Pa и температуре 100°C в течение 2–3 h. Термическое вакуумное осаждение покрытий $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и покрытий BPDA толщиной

до 10 nm на ZnO-подложку проводили со скоростью 0.1 nm/minute. Во время осаждения пленок допускали повышение давления в вакуумной камере на порядок от базового давления (10^{-6} Pa). Сформированные так пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ демонстрируют рефлексы при измерениях методом дифракции рентгеновских лучей, соответствующие периодам 3.8 и 1.9 nm [26]. Поэтому авторы полагают, что пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ обладают поликристаллической структурой.

Измерения электронных свойств пленок проводили методом спектроскопии полного тока (TCS) [32,33] для серии последовательно нанесенных пленок каждого вида при увеличении суммарной толщины органического покрытия до 8–10 nm. В TCS-эксперименте, падающий пучок электронов площадью поперечного сечения 0.2–0.4 mm² направляли по нормали к исследуемой поверхности и с помощью lock-in усилителя регистрировали производную по энергии от полного тока $S(E)$, проходящего через образец. Энергию электронов в тестирующем пучке варьировали в диапазоне от 0 до 25 eV относительно уровня вакуума (E_{vac}) исследованной поверхности. При совпадении энергии падающего пучка и E_{vac} поверхности регистрируется первичный максимум TCS. С учетом калибровки TCS-инструмента на известной поверхности, например, на поверхности высокоориентированного пиролитического графита (HOPG — Highly Oriented Pyrolytic Graphite), можно установить энергетическое расположение E_{vac} относительно уровня Ферми системы (E_{F}). Для ШЗП поверхности HOPG характерны хорошо воспроизводимые значения электронной работы выхода около 4.6 eV [34]. При превышении энергии пучка значения E_{vac} поверхности формируется тонкая структура спектров полного тока (ТССПТ). ТССПТ несет информацию о расположении особенностей функции плотности незаполненных электронных состояний (DOUS — Density of Unoccupied Electronic States) исследованного материала [25,33,35]. Топографию поверхности покрытия ZnO и поверхностей исследованных пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и BPDA изучали с помощью методики AFM в полуконтактной моде на микроскопе Integra Spectra (Spectrum Instruments Ltd.).

3. Результаты и обсуждение

Экспериментально методом TCS исследовали структуру незаполненных электронных состояний зоны проводимости в процессе термического осаждения органической пленки на ALD ZnO-подложку. Энергетический диапазон для регистрации тонкой структуры спектров полного тока (ТССПТ) расположен обычно в пределах от 5 до 25 eV выше E_{F} . Максимумы ТССПТ обусловлены повышением интенсивности входа падающих электронов в исследованную поверхность, что следует связывать с повышением плотности разрешенных электронных состояний при данной энергии. Серия ТССПТ, измеренная

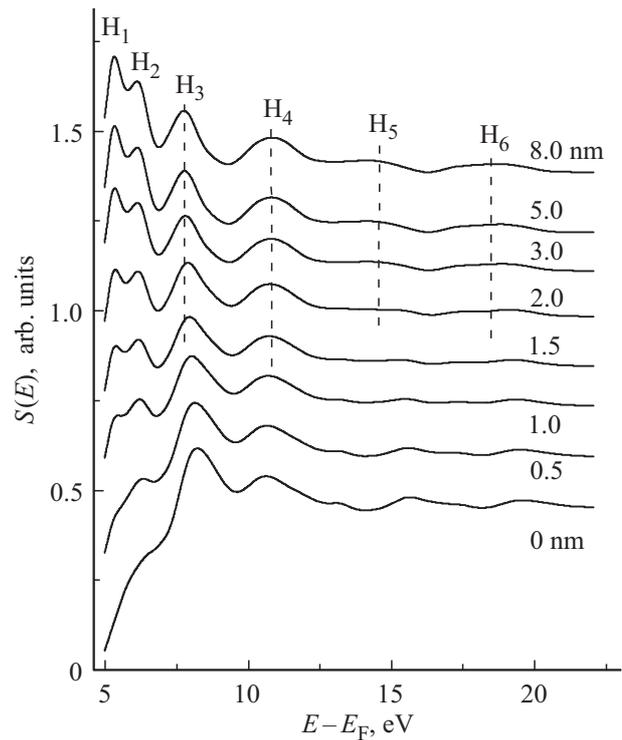


Рис. 2. ТССПТ в процессе осаждения пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ на поверхность ZnO, сформированную методом ALD. Подписи около кривых указывают соответствующую толщину органического покрытия от 0 до 8 nm. Отмечены наиболее отчетливые максимумы $H_1\text{--}H_6$ в ТССПТ пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$. Вертикальные пунктирные линии показаны для удобства сравнения положений максимумов.

в процессе осаждения пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ на поверхность ALD ZnO, представлена на рис. 2. При толщине органического покрытия 0 nm, то есть до нанесения органической пленки измерена ТССПТ исследованной подложки ZnO. ТССПТ ZnO демонстрирует несколько отчетливых максимумов, в том числе при энергиях 8.0, 10.5 и 16.0 eV. Такую ТССПТ мы наблюдали и ранее при исследованиях поверхности ALD ZnO [23].

По мере осаждения пленки соолигомера $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ толщиной до 8 nm ТССПТ подложки затухала, и одновременно нарастала интенсивность новых максимумов ТССПТ (рис. 2). ТССПТ поверхности с характерными максимумами $H_1\text{--}H_6$ была сформирована при толщине пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ 5–8 nm. Максимумы $H_1\text{--}H_6$ характерны для ТССПТ пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и на поверхности других подложек, окисленного кремния, поликристаллического золота [24,26]. В процессе осаждения пленки BPDA ТССПТ ALD ZnO-подложки затухала, и нарастала ТССПТ с максимумами $B_1\text{--}B_4$ (рис. 3). Для анализа скорости нарастания ТССПТ осаждаемого покрытия при увеличении толщины покрытия в случае пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ удобно выбрать максимум H_2 при энергии 6.0 eV. Максимумы H_2 и H_4 также достаточно

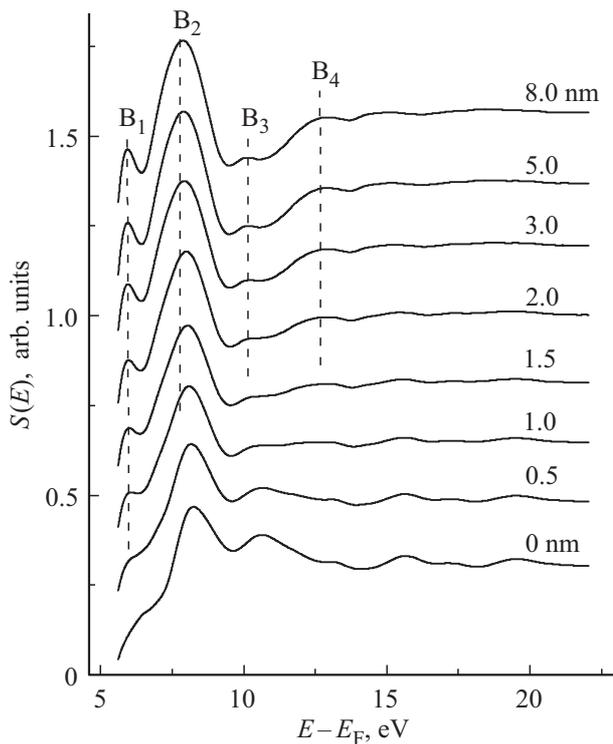


Рис. 3. ТССПТ в процессе осаждения пленок BPDA на поверхность ZnO, сформированную методом ALD. Подписи около кривых указывают соответствующую толщину органического покрытия от 0 до 8 nm. Отмечены наиболее отчетливые максимумы B_1 – B_4 в ТССПТ пленок BPDA. Вертикальные пунктирные линии показаны для удобства сравнения положений максимумов.

явно выражены (рис. 2), но они расположены при энергиях, близких по значению к энергиям расположения достаточно интенсивных максимумов ZnO-подложки. В случае пленки BPDA для анализа нарастания ТССПТ удобно выбрать максимум B_1 (рис. 3). Для электронов с энергией 6 eV выше уровня E_F длина свободного пробега (λ) составляет приблизительно 4 nm [36]. Для анализа затухания ТССПТ-подложки удобно выбрать разницу интенсивностей ТССПТ-максимума при 10.5 eV и минимума при 14 eV. При энергии электрона 11–14 eV выше уровня E_F — составляет приблизительно 3 nm [36]. Как подробно обсуждалось в работах [33,36], следует ожидать экспоненциального роста интенсивностей ТССПТ осаждаемого покрытия и затухания особенностей ТССПТ подложки с изменением толщины покрытия (d) в случае формирования сплошного органического покрытия. Показатель этой экспоненциальной зависимости дается выражением $2d/\lambda$ [36]. В результате проведенного анализа был установлен экспоненциальный характер нарастания интенсивностей максимумов ТССПТ CH_3 -PTTP- CH_3 и BPDA. Появление максимумов ТССПТ, характерных для этих пленок, было обнаружено на ранней стадии

осаждения, когда толщина осажденного слоя составила 0.5 nm.

Путем измерения энергетического положения первичного TCS-максимума в процессе осаждения органического слоя проводили анализ изменения значения E_{vac} исследованной поверхности относительно E_F . Значения $E_{\text{vac}} - E_F$, т.е. работы выхода поверхности ZnO подложки составили 4.2 ± 0.1 eV. Это хорошо соответствует результатам исследований поверхности ALD ZnO, но существенно ниже значения работы выхода поверхности монокристалла ZnO (000-1) [23,37]. В результате осаждения пленки CH_3 -PTTP- CH_3 обнаружено снижение работы выхода до 4.0 eV (рис. 4, a). Такое же значение $E_{\text{vac}} - E_F$ было установлено нами ранее при исследованиях пленок CH_3 -PTTP- CH_3 на поверхности $(\text{SiO}_2)_n$ -Si [24]. С учетом литературных данных следует полагать, что при отсутствии взаимодействия на границе подложка/органическая пленка стыковка энергетических уровней и уровня E_{vac} происходит в достаточно узком слое, толщиной 1–3 nm [38–40], и по достижении такой толщины органического покрытия значения работы выхода не зависят от материала подложки. Вместе с этим роль подложки может стать определяющей при формировании пограничного барьера в случае формирования пограничных электронных состояний или диффузии атомов подложки в органическую пленку [40–42]. Так, при исследованиях пленок CH_3 -PTTP- CH_3 на поверхности поликристаллического золота значения работы выхода этих пленок превышали 4.6 eV [26]. Уменьшение величины $E_{\text{vac}} - E_F$ в процессе осаждения CH_3 -PTTP- CH_3 на ALD ZnO подложку соответствует переносу отрицательного заряда из органической пленки в подложку. Перенос заряда на границе пленки BPDA

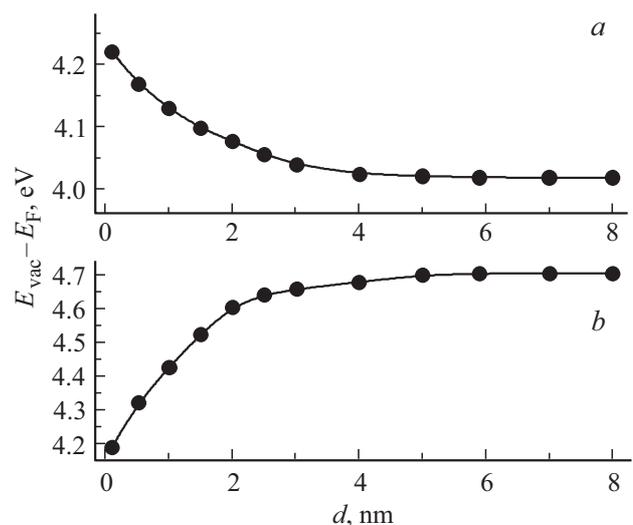


Рис. 4. Анализ энергетического положения первичного TCS-максимума по мере увеличения толщины органического покрытия. Изменение положения уровня вакуума E_{vac} относительно E_F при термическом осаждении пленки (a) CH_3 -PTTP- CH_3 и (b) BPDA.

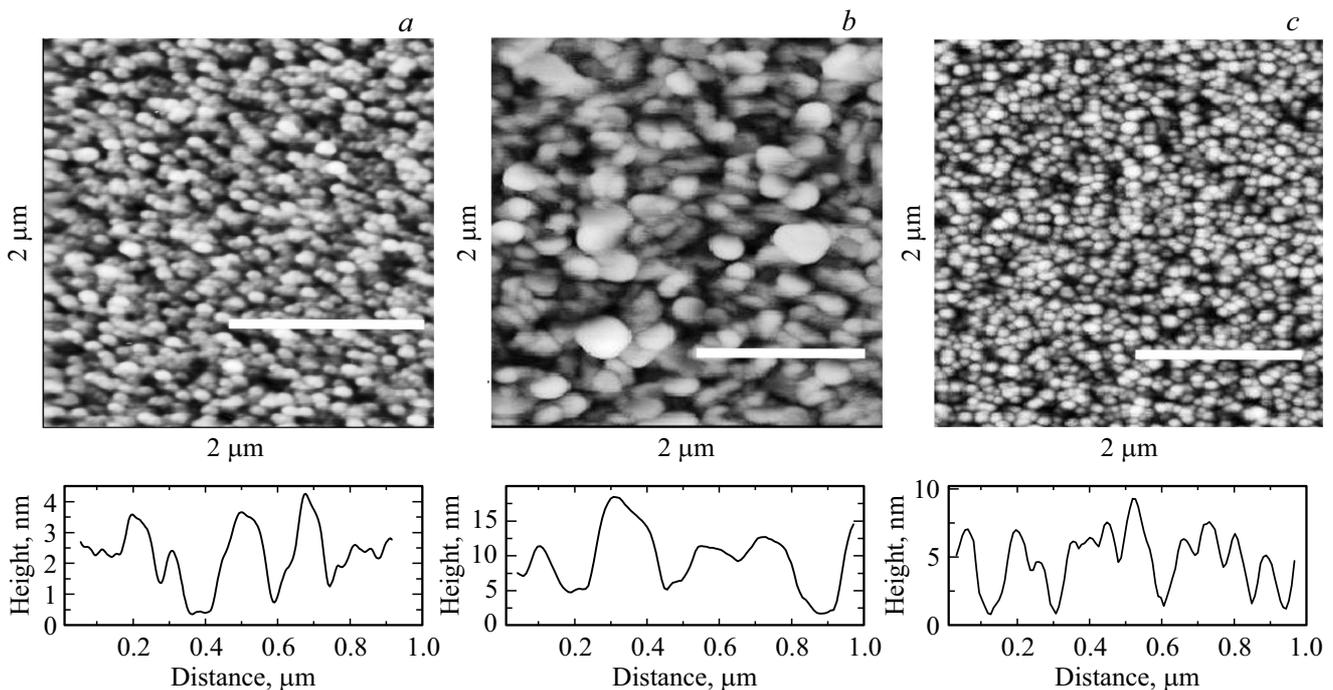


Рис. 5. (a) $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ AFM-изображение участка поверхности слоя ZnO, приготовленного методом ALD. Градации серого цвета от черного до белого соответствуют перепаду высот от 0 nm до 20 nm. Профиль участка поверхности на отрезке белым горизонтальным баром, показан снизу. (b) $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ AFM-изображение участка поверхности пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ на поверхности ALD ZnO. Градации серого цвета от черного до белого соответствуют перепаду высот от 0 до 40 nm. Профиль участка поверхности на отрезке, отмеченном белым горизонтальным баром, показан снизу. (c) $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ AFM-изображение участка поверхности пленки BPDA на поверхности ALD ZnO. Градации серого цвета от черного до белого соответствуют перепаду высот от 0 до 30 nm. Профиль участка поверхности на отрезке, отмеченном белым горизонтальным баром, показан снизу.

и ALD ZnO подложки происходит в обратном направлении, так как при формировании этого пограничного барьера зарегистрировано увеличение работы выхода до $4.7\ \text{eV}$ (рис. 4, b). Следует полагать, что аналогично хорошо известным органическим материалам на основе перилена-тетракарбонового диангидрида и нафталин-тетракарбонового диангидрида [13–15], пленки BPDA обладают достаточно высокими значениями электронного сродства. Поэтому в случае пленок BPDA значения $E_{\text{vac}} - E_{\text{F}}$ превышают аналогичные характеристики пленок бис-метил замещенных TPSCO и исследованных поверхностей ALD ZnO и окисленного кремния.

Результаты диагностики топографии исследованных поверхностей: поверхности ALD ZnO подложки, поверхностей пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и BPDA представлены на рис. 5. Все исследованные материалы представляют собой сплошное покрытие на достаточно больших участках поверхности порядка $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$. Исследованные поверхности имеют зернистую структуру с различающимся размером зерен и различающейся степенью шероховатости. Так, характерный размер зерен покрытия ALD ZnO в плоскости поверхности лежит в пределах 50–200 nm, а характерный перепад высот не превышает 4 nm (рис. 5, a). Установленная шероховатость слоя ALD ZnO соответствует результатам наших исследований

этого материала методом дифракции рентгеновских лучей [23]. Пленка $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ сформирована зернами, размером 200 nm и более в плоскости поверхности, а перепад высот достигает 15 nm (рис. 5, b). Пленка BPDA сформирована зернами, размером 50–100 nm в плоскости поверхности, а перепад высот достигает 10 nm (рис. 5, c). Формирование сплошных пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и BPDA дает возможность проводить анализ изменения интенсивности максимумов ТССПТ, предполагая экспоненциальный рост интенсивности максимумов осаждаемого слоя и экспоненциальное затухание сигнала подложки [33,36].

4. Заключение

Методом термического вакуумного осаждения сформированы пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и пленки BPDA толщиной 8–10 nm на поверхности послойно выращенного ZnO. Методом TCS по мере увеличения толщины органической пленки установлена структура максимумов незаполненных электронных состояний пленок $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ и BPDA в зоне проводимости в энергетическом диапазоне от 5 до 20 eV выше E_{F} . В результате осаждения пленки $\text{CH}_3\text{-PTTP-CH}_3$ обнаружено снижение работы выхода до 4.0 eV, по сравнению со значением ра-

боты выхода 4.2 eV, измеренной для ALD ZnO-подложки. Это соответствует переносу отрицательного заряда из пленки CH₃-PTTP-CH₃ в подложку. Перенос заряда на границе пленки BPDA и ALD ZnO подложки происходит в обратном направлении, так как при формировании этого пограничного барьера зарегистрировано увеличение работы выхода до 4.7 eV. Исследованные пленки CH₃-PTTP-CH₃ и BPDA и послойно выращенный ZnO представляют собой сплошное покрытие на достаточно больших участках поверхности порядка 10 μm × 10 μm. Шероховатость ZnO поверхности не превышает 4 nm, а шероховатость поверхностей пленок CH₃-PTTP-CH₃ и BPDA составляет 10–15 nm.

Финансирование работы

TCS-исследования пленок BPDA выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-13-00021, <https://rscf.ru/project/19-13-00021/>. Исследования структур CH₃-PTTP-CH₃/ZnO выполнены при поддержке гранта РФФИ (20-03-00026). Синтез CH₃-PTTP-CH₃ выполнен в рамках Госзадания ИСПМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования (тема FFSM-2021-0005). AFM-измерения выполнены при финансовой поддержке СПбГУ (проект № 93021679) с использованием оборудования Научного парка СПбГУ „Физические методы исследования поверхности“, „Инновационные технологии композитных наноматериалов“ и „Диагностика функциональных материалов для медицины, фармакологии и наноэлектроники“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Zhou, C. Fuentes-Hernandez, J. Shim, J. Meyer, A.J. Giordano, H. Li, P. Winget, T. Papadopoulos, H. Cheun, J. Kim, M. Fenoll, A. Dindar, W. Haske, E. Najafabadi, T.M. Khan, H. Sojoudi, S. Barlow, S. Graham, J.L. Brédas, S.R. Marder, A. Kahn, B. Kippelen. *Science* **336**, 327 (2012).
- [2] A.Y. 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.Y. Paraschuk. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21**, 11578 (2019).
- [3] А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, И.Н. Трапезникова, В.Н. Петров. *ФТТ* **58**, 1882 (2016).
- [4] M. Krzywiecki, L. Grzadziel, P. Powroznik, M. Kwoka, J. Rechmann, A. Erbe. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 16092 (2018).
- [5] E. Kumral, H.Y. Yenilmez, S. Albayrak, A.N. Sahin, A. Altindal, Z.A. Bayir. *Dalton Transactions* **49**, 9385 (2020).
- [6] T. Sengoku, T. Yamao, S. Hotta. *J. Non-Cryst. Solids* **358**, 2525 (2012).
- [7] F. Sasaki, Y. Kawaguchi, H. Mochizuki, S. Haraichi, T. Ishitsuka, T. Ootsuka, T. Tomie, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao, S. Hotta. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **620**, 153 (2015).
- [8] M.S. Kazantsev, V.G. Konstantinov, D.I. Dominskiy, V.V. Bruevich, V.A. Postnikov, Y.N. Luponosov, V.A. Tafeenko, N.M. Surin, S.A. Ponomarenko, D.Y. Paraschuk. *Synt. Met.* **232**, 60 (2017).
- [9] L.G. Kudryashova, M.S. Kazantsev, V.A. Postnikov, V.V. Bruevich, Y.N. Luponosov, N.M. Surin, O.V. Borshchev, S.A. Ponomarenko, M.S. Pshenichnikov, D.Y. Paraschuk. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 10088 (2016).
- [10] Y. Kawaguchi, F. Sasaki, H. Mochizuki, T. Ishitsuka, T. Tomie, T. Ootsuka, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao, S. Hotta. *J. Appl. Phys.* **113**, 083710 (2013).
- [11] А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, Д.А. Кириленко, Л.Б. Матюшкин, В.А. Мошников, *ФТТ* **61**, 388 (2019).
- [12] M. Goumri, R. Hatel, B. Ratier, M. Baitoul. *Appl. Phys. A* **126**, 647 (2020).
- [13] 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).
- [14] D. Ozdal, N.P. Aydinlik, J.B. Bodapati, H. Icil. *Photochem. Photobiol. Sci.* **16**, 262 (2017).
- [15] R. Tonner, P. Rosenowa, P. Jakob. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18**, 6316 (2016).
- [16] F. Wurthner, C. Thalacker, S. Diele, C. Tschierske. *Chem. Eur. J.* **7**, 2245 (2001).
- [17] A.S. Komolov, P. J. Moeller, Y. G. Aliaev, E.F. Lazneva, S.A. Akhremchik, F.S. Kamounah, J. Mortenson, K. Schaumburg. *J. Mol. Struct.* **744/747**, 145 (2005).
- [18] M. Krzywiecki, L. Grzadziel, A. Sarfraz, D. Iqbal, A. Szwajca, A. Erbe. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17**, 10004 (2015).
- [19] A.S. Komolov, P.J. Moeller. *Appl. Surf. Sci.* **212**, 497 (2003).
- [20] И.А. Аверин, И.А. Пронин, Н.Д. Якушова, А.А. Карманов, Е.А. Алимова, С.Е. Игошина, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *ЖТФ* **89**, 1917 (2019).
- [21] H. Frankenstein, C.Z. Leng, M.D. Losego, G.L. Frey. *Organic Electron.* **64**, 37 (2019).
- [22] T.N. Walter, S. Lee, X.Zhang, M. Chubarov, J.M.Redwing, T.N. Jackson, S.E. Mohny. *Appl. Surf. Sci.* **480**, 43 (2019).
- [23] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, В.С. Соболев, Е.В. Жижин, С.А. Пшеничнюк, Н.Л. Асфандиаров, В. Handke. *ФТТ* **63**, 1177 (2021).
- [24] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, Ю.А. Панина, Г.Д. Зашихин, С.А. Пшеничнюк, О.В. Борщев, С.А. Пономаренко, В. Handke. *ФТТ* **60**, 1012 (2018).
- [25] 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).
- [26] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, В.С. Соболев, С.А. Пшеничнюк, О.В. Борщев, С.А. Пономаренко, В. Handke. *ФТТ* **62**, 1741 (2020).
- [27] A.S. Komolov, E.F. Lazneva, S.N. Akhremtchik. *App. Surf. Sci.* **256**, 2419 (2010).
- [28] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, А.В. Барамыгин, В.С. Соболев, С.А. Пшеничнюк, Н.Л. Асфандиаров, В.А. Крайкин, В. Handke. *ФТТ* **62**, 1116 (2020).
- [29] Y. Tong, F. Nicolas, S. Kubsy, H. Oughaddou, F. Sirotti, V. Esaulov, A. Bendounan. *J. Phys. Chem. C* **121**, 9, 5050 (2017).

- [30] S.A. Pshenichnyuk, A. Modelli, N.L. Asfandiarov, E.F. Lazneva, A.S. Komolov. *J. Chem. Phys.* **151**, 214309 (2019).
- [31] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, А.И. Романычев. *ФТТ* **58**, 1398 (2016).
- [32] P.J. Moeller, S.A. Komolov, E.F. Lazneva, A.S. Komolov. *Appl. Surf. Sci.* **175–176**, 663 (2001).
- [33] A.S. Komolov, P. J. Moeller, E.F. Lazneva. *J. Electron. Spec. Rel. Phen.*, **131–132**, 67 (2003).
- [34] J. Hwang, A. Wan, A. Kahn. *Mater. Sci. Eng. R* **64**, 1 (2009).
- [35] I. Bartos. *Progr. Surf. Sci.* **59**, 197 (1998).
- [36] С.А. Комолов, Э.Ф. Лазнева, А.С. Комолов. *Письма в ЖТФ* **29**, 13 (2003).
- [37] A. Komolov, P.J. Moeller, J. Mortensen, S. Komolov, E. Lazneva. *Surf. Sci.* **586**, 129 (2005).
- [38] I.G. Hill, J. Schwartz, A. Kahn. *Organic Electron.* **1**, 5 (2000).
- [39] A.L. Shu, W.E. McClain, J. Schwartz, A. Kahn. *Organic Electron.* **15**, 2360 (2014).
- [40] S. Braun, W. Salaneck, M. Fahlman. *Adv. Mater.* **21**, 1450 (2009).
- [41] A.S. Komolov, S.N. Akhremtchik, E.F. Lazneva. *Spectrochim. Acta A* **798**, 708 (2011).
- [42] M. Krzywiecki, L. Grzadziel, P. Powroznik, M. Kwoka, J. Rechmann, A. Erbe. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 16092 (2018).

Редактор К.В. Емцев