

Незаполненные электронные состояния ультратонких пленок кватерфенила на поверхностях послойно сформированного CdS и окисленного кремния

© А.С. Комолов¹, Э.Ф. Лазнева¹, Н.Б. Герасимова¹, В.С. Соболев¹, Е.В. Жижин¹,
С.А. Пшеничнюк², Н.Л. Асфандияров², В. Handke³

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

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

³ AGH University of Science and Technology, Faculty of Material Science and Ceramics,
30-059 Kraków, Poland

E-mail: a.komolov@spbu.ru

Поступила в Редакцию 1 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 3 апреля 2021 г.

Принята к публикации 3 апреля 2021 г.

Приведены результаты исследования незаполненных электронных состояний и формирования пограничного потенциального барьера при термическом вакуумном осаждении ультратонких пленок кремния 4-кватерфенила на поверхности CdS и на поверхности окисленного кремния. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) установлено, что атомные концентрации Cd и S являлись одинаковыми в составе поверхности слоя CdS толщиной 75 nm, сформированного методом молекулярного наплавления (ALD — atomic layer deposition). Исследования электронных характеристик пленок 4-кватерфенила, толщиной до 8 nm, проводили в процессе их осаждения на поверхность сформированного слоя CdS и на поверхность окисленного кремния методом спектроскопии полного тока (TCS) в энергетическом диапазоне от 5 до 20 eV выше E_F . Установлено энергетическое расположение основных максимумов тонкой структуры спектров полного тока (ТССПТ) пленок 4-кватерфенила. Расположение максимумов воспроизводимо при использовании двух выбранных материалов подложек. Установлено незначительное снижение работы выхода, от 4.2 до 4.1 eV, в процессе термического осаждения 4-кватерфенила на поверхность CdS. При осаждении пленки 4-кватерфенила на поверхность окисленного обнаружено повышение значений работы выхода от 4.2 до 4.5 eV. Обсуждаются возможные механизмы физико-химического взаимодействия между пленкой 4-кватерфенила и поверхностью исследованных подложек, приводящие к различию наблюдаемых значений работы выхода пленок на этих подложках.

Ключевые слова: олигомеры фенилена, 4-кватерфенил, ультратонкие пленки, CdS–метод молекулярного наплавления (ALD — atomic layer deposition), электронные свойства, низкоэнергетическая электронная спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS).

DOI: 10.21883/FTT.2021.08.51175.071

1. Введение

Тонкие пленки олигофениленов, а также соолигомеров фенилена и тиофена представляют интерес в качестве материалов для разработки органических диодных и транзисторных устройств [1–3]. При определенных условиях синтеза удается сформировать монокристаллические фрагменты таких олигомеров [4]. Значения подвижности носителей заряда в макетах органических полевых транзисторов (OFET) соолигомеров тиофена и фенилена достигали порядка $10^{-1} \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ [5]. Увеличения подвижности носителей заряда примерно на порядок можно ожидать при использовании гибридных органических/неорганических слоев в составе OFET [6,7]. В качестве модельного ультратонкого гибридного слоя может выступать и пограничная область, сформированная пленкой олигомера и поверхностью

твердотельной подложки. Среди олигомеров фенилена в качестве достаточно простой модельной молекулы интерес представляет 4-кватерфенил (4-quaterphenyl, 4Q), называемый также пара-кватерфенилом (*p*-quaterphenyl) (рис. 1). Тонкие и ультратонкие слои 4Q на поверхности твердотельных подложек продемонстрировали полупроводниковые свойства [8,9] и возможность использования в качестве электронных устройств на основе отдельных молекул [10]. Согласно результатам работы [8], значения оптической ширины запрещенной зоны термически осажденных в вакууме пленок 4Q составляли 2.3–2.4 eV. Значительный интерес исследователей привлекают материалы подложек на основе двумерных (2D) неорганических полупроводников, например, CdS и ZnO, сформированных методом ALD [11–13]. При формировании CdS-методом ALD используют Cd-содержащие и серосодержащие

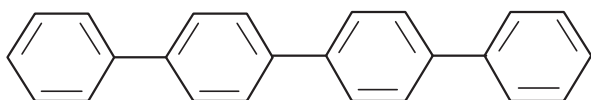


Рис. 1. Структурная формула молекулы 4-кватерфенила (4Q).

реагенты. При температурах 150–200°C потоки паров этих реагентов поочередно направляют на кремниевую подложку. Показано, что так могут быть сформированы сплошные CdS-слои толщиной от нескольких nm до нескольких сотен nm. Приготовленные 2D CdS-пленки имеют ширину запрещенной зоны 2.4 eV, т. е. значения, характерные для этого полупроводникового материала.

Ранее нами были исследованы электронные состояния зоны проводимости пленок, термически осажденных в вакууме, на основе соолигомеров фенилена и тиофена [14] и пленок 4Q на кремниевой подложке [15]. Эксперименты по исследованию электронных состояний органических материалов и по исследованию формирования потенциального барьера между органическим материалом и подложкой проводили с использованием метода спектроскопии полного тока (TCS — Total Current Spectroscopy) [16,17]. Для нескольких видов сопряженных органических материалов было показано, что TCS-результаты по установлению структуры максимумов плотности незаполненных электронных состояний плотности (DOUS) хорошо соответствуют результатам полученным другими электронно-спектроскопическими методами, такими как спектроскопия электронного захвата (electron attachment spectroscopy) [18,19], и результатам теоретических расчетов на основе теории функционала плотности [14,15]. В настоящей работе приведены результаты исследований методом TCS незаполненных электронных состояний ультратонких пленок 4Q на поверхности CdS, сформированного методом ALD. Приводится сравнение с TCS-результатами исследований пленок 4Q на поверхности окисленного кремния. Особое внимание уделено установлению атомного состава подложки CdS, сформированной в ходе работы.

2. Эксперимент

В качестве подложек для нанесения пленок использовали поверхности (SiO₂)*n*-Si, и поверхность бинарного полупроводника CdS, приготовленную методом ALD. Для синтеза CdS использовали реагенты диметил-Cd и H₂S, в атмосфере которых поочередно экспонировали поверхность кремниевой подложки, как описано в работах [11,20]. Производили поочередное нанесение слоев атомов Cd и S. Температуру во время синтеза поддерживали 200°C. В настоящей работе использовали слои CdS толщиной 75 nm с шероховатостью не более 5 nm. Поверх-

ность (SiO₂)*n*-Si, предварительно очищали в 10% растворе HF. В результате такой процедуры очистки на поверхности кремния формируется слой оксида кремния толщиной 3–5 nm, и из воздуха адсорбируются кислород- и углеродсодержащие примеси [14,21–24]. Поэтому непосредственно перед измерениями проводили очистку поверхностей подложек методом ионной бомбардировки, пучком ионов Ar⁺. Изучение атомного состава сформированного CdS-слоя проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS) на фотоэлектронном спектрометре Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific Inc.) с энергией падающих фотонов Al K_α = 1486.6 eV. Исследования проводили в условиях сверхвысокого вакуума порядка 10⁻⁷ Pa при комнатной температуре. При анализе измеренных XPS-спектров использовали библиотеку стандартных XPS-спектров производителя оборудования, учитывали атомные факторы чувствительности регистрации сигнала [25].

Для формирования органических пленок использовали реактив 4-кватерфенил (4Q), приобретенный в Acros Organics (рис. 1). Кювета с реактивом была обезгажена путем выдерживания в вакууме при базовом давлении 10⁻⁶ Pa при температуре 100°C в течение 2–3 h очищены в течение нескольких часов путем прогрева при 100°C в высоком вакууме. Термическое осаждение 4Q-пленок этих проводили при скорости 0.1 nm/min. Расстояние от кюветы с реактивом до подложки составляло 10 cm. Толщину осажденного слоя контролировали с помощью кварцевого резонатора. В процессе осаждения пленок допускали повышение давления в вакуумной камере на порядок от базового давления.

Измерения электронных характеристик серии последовательно нанесенных пленок 4Q проводили методом спектроскопии полного тока (TCS), которую обсуждали подробно в работах [14,26]. Энергию электронов в тестирующем пучке варьировали в диапазоне от 0 до 25 eV относительно уровня вакуума (*E*_{vac}) исследованной поверхности. При превышении энергии пучка значения *E*_{vac} формируется тонкая структура спектров полного тока (ТССПТ). Расположение максимумов ТССПТ несет информацию о расположении особенностей функции плотности незаполненных электронных состояний (DOUS — Density of Unoccupied Electronic States) исследованного материала [14,27]. При увеличении толщины 4Q-покрытия до 8–10 nm ТССПТ, исходящая от подложки, затухала, и формировалась новая ТССПТ-структура максимумов, исходящая от осажденного органического слоя. Калибровку энергетической шкалы относительно уровня Ферми системы (*E*_F) проводили с использованием поверхности высокоупорядоченного пиролитического графита (HOPG — Highly Oriented Pyrolytic Graphite). Поверхность HOPG демонстрирует хорошо воспроизводимые значения электронной работы выхода около 4.6 eV [28].

3. Результаты и обсуждение

Выращенные послойно при использовании метода ALD-покрытия CdS обладают хорошо воспроизводимыми свойствами [11,12]. Однако выбор температурного режима и других характеристик ALD-процесса может в некоторой степени влиять на структурные и электронные свойства приготовленных полупроводников. Для уточнения атомного состава сформированных слоев CdS были проведены исследования методом XPS. В XPS-спектрах образцов, помещенных в аналитическую вакуумную камеру после нахождения на воздухе, обнаружены отчетливые максимумы, соответствующие атомам CdS, а также атомов адсорбированных примесей O и C. Относительная концентрация примесных атомов C в 2–3 раза превышала концентрацию атомов O, поэтому для анализа выбрали XPS-максимумы основных уровней C_{1s} , Cd_{3d} и S_{2p} (рис. 2). С учетом факторов XPS-чувствительности [25] были установлены относительные концентрации атомных компонент исследованной поверхности. Так, до проведения предварительной обработки ионами Ar^+ относительная концентрация атомов C составила примерно 30%, содержание атомов Cd и S было примерно одинаковым и составило примерно 30%, содержание атомов O составило 10%. Известно, что ввиду адсорбции примесей из воздуха содержание углерода и кислорода на поверхности полупроводников может превышать 25–30% [29,30]. Для очистки адсорбатов с исследованной поверхности использовали обработку ионами Ar^+ с энергией 3 keV в течение 10 с. В результате очистки относительная концентрация атомов C снизилась менее 10%, а содержание атомов Cd и S достигло 40–45%. Соответствующее изменение интенсивностей максимумов основных уровней C_{1s} , Cd_{3d} и S_{2p} в результате проведенной очистки поверхности видно из рис. 2 при сравнении XPS-спектров, измеренных до и после Ar^+ очистки. Отметим, что форма максимумов Cd_{3d} и S_{2p} в результате очистки практически не изменилась (рис. 2, *c, d, e, f*). При этом и соотношение относительных концентраций атомов Cd и S осталось неизменным и составило 1:1. Такой атомный состав слоя CdS, приготовленного методом ALD, отличается от состава монокристаллического CdS, исследованного нами ранее. Так, при исследовании монокристаллической поверхности CdS(0001) соотношение концентраций атомов Cd и S составляло 1:1.5 [31,32].

Экспериментально измеренная тонкая структура спектров полного тока (ТССПТ) обусловлена изменением вероятности входа падающих электронов в исследуемую поверхность в зависимости от энергии электронов в тестирующем пучке. Энергетический диапазон для регистрации ТССПТ расположен обычно в пределах от 5 до 25 eV выше E_F . Серия ТССПТ, измеренная в процессе осаждения пленок 4Q на поверхность ALD CdS, представлена на рис. 3. При толщине органического покрытия 0 nm ТССПТ соответствует поверхности подложки CdS без органического покрытия. В этой ТССПТ

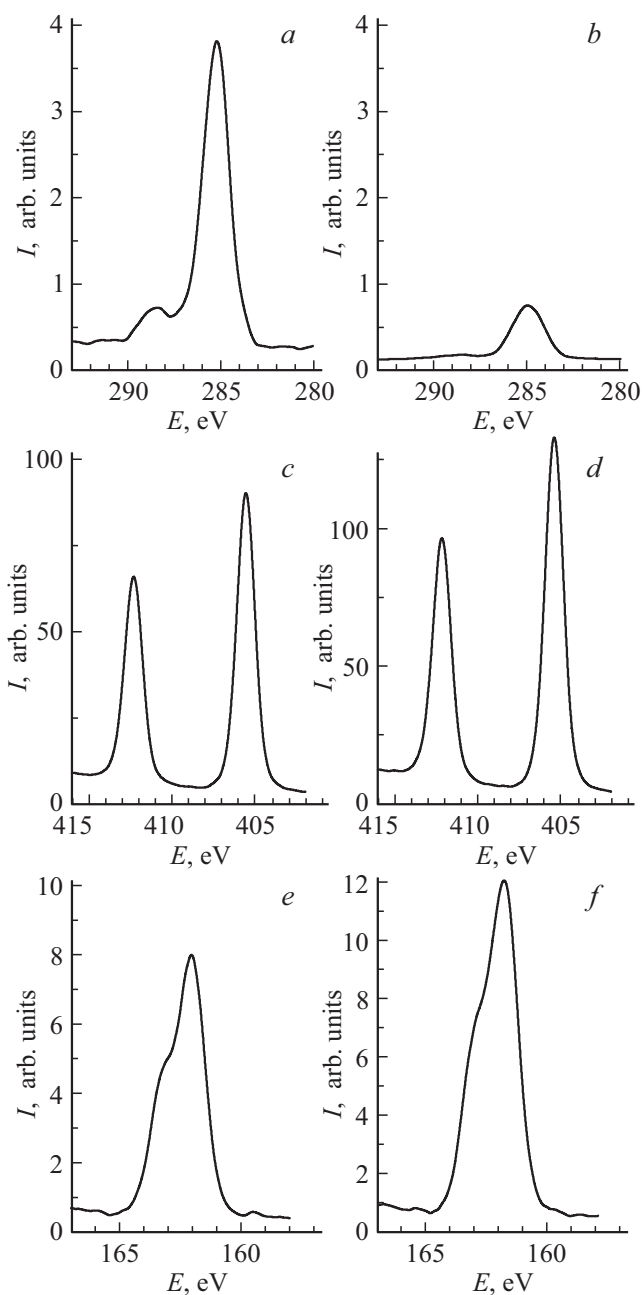


Рис. 2. Рентгеновские фотоэлектронные (XPS) спектры поверхности CdS подложки, сформированной методом ALD, в области максимума основного уровня C_{1s} без предварительной обработки (*a*) и после обработки ионами Ar^+ (*b*), в области максимума основного уровня Cd_{3d} без предварительной обработки (*c*) и после обработки ионами Ar^+ (*d*), в области максимума основного уровня S_{2p} без предварительной обработки (*e*) и после обработки ионами Ar^+ (*f*). Обработку исследованных поверхностей проводили ионами Ar^+ с энергией 3 keV в течение 10 с.

наблюдаются отчетливые максимумы при энергиях 7.0, 9.5 и 12.5 eV (рис. 3). Расположение двух низкоэнергетических максимумов соответствует расположению максимумов ТССПТ от кристаллической поверхности

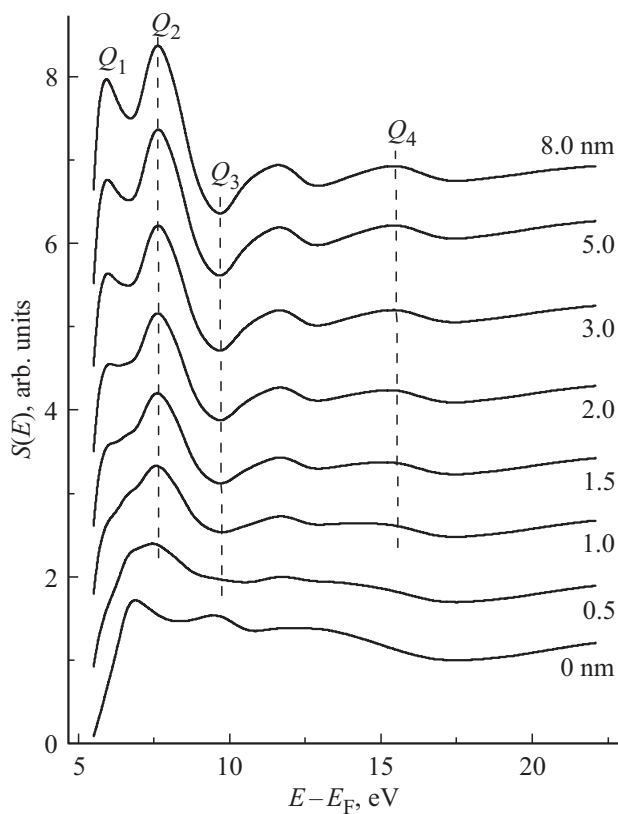


Рис. 3. Серия ТССПТ в процессе осаждения пленок $4Q$ на поверхность CdS, сформированную методом ALD. Подписи около кривых указывают соответствующую толщину органического покрытия от 0 до 8 nm. Наиболее отчетливые максимумы ТССПТ-пленок $4Q$ обозначены Q_1 – Q_4 . Вертикальные штриховые пунктирные линии показаны для удобства сравнения положений максимумов.

CdS [31]. В процессе осаждения органического покрытия $4Q$ толщиной до 8 nm ТССПТ подложки затухала, и одновременно нарастала интенсивность новых максимумов ТССПТ Q_1 – Q_4 (рис. 3). Эти максимумы расположены при энергиях 6.0, 7.5, 11.5 и 15.5 eV, что хорошо соответствует расположению максимумов ТССПТ-пленок $4Q$ на поверхностях поликристаллического золота и окисленного кремния, исследованных нами ранее [15]. При этом в области энергий выше 18 eV в ТССПТ на рис. 3 максимумов не обнаружено, а в работе [15] удалось зарегистрировать максимум Q_5 при 20 eV, исходящий от пленки $4Q$. Вероятно, выбор материала подложки или отклонения в условиях термического осаждения пленок могут приводить к размытию слабовыраженных особенностей ТССПТ. Вместе с этим для разных видов сопряженных органических пленок мы показали, что энергетическое положение наиболее отчетливых максимумов ТССПТ не зависит от выбора материала подложки при толщине органического покрытия более 5 nm [14,17,30,31]. С целью установления возможного влияния подложки был произведено измерение серии ТССПТ в процессе осаждения пленок $4Q$

на поверхность подложки $(\text{SiO}_2)_n\text{-Si}$ (рис. 4). ТССПТ $(\text{SiO}_2)_n\text{-Si}$ подложки (рис. 4) при нулевой толщине органического покрытия явно отличается от ТССПТ CdS подложки (рис. 3). В процессе осаждения пленки $4Q$ уже при толщине органического покрытия более 1 nm начинают формироваться максимумы Q_1 – Q_4 , характерные для пленки $4Q$. При толщине пленки более 5 nm ТССПТ исследованной поверхности совпадает для случаев выбранных подложек $(\text{SiO}_2)_n\text{-Si}$ и CdS, приготовленной методом ALD (рис. 3 и 4). Установление π^* или σ^* характера наблюдаемых максимумов Q_1 – Q_4 ТССПТ пленок $4Q$ целесообразно провести с учетом известных из литературы результатов теоретических расчетов и результатов исследований методом ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии [9,15]. Так, два максимума ТССПТ Q_1 и Q_2 , расположенные в энергетическом диапазоне от 5 до 10 eV выше E_F (рис. 3 и 4), следует связать с границами зон p^* электронных состояний. Максимумы ТССПТ Q_3 и Q_4 при энергиях 11.5 и 15.5 eV, вероятнее всего, соответствуют границами энергетических зон σ^* электронных состояний.

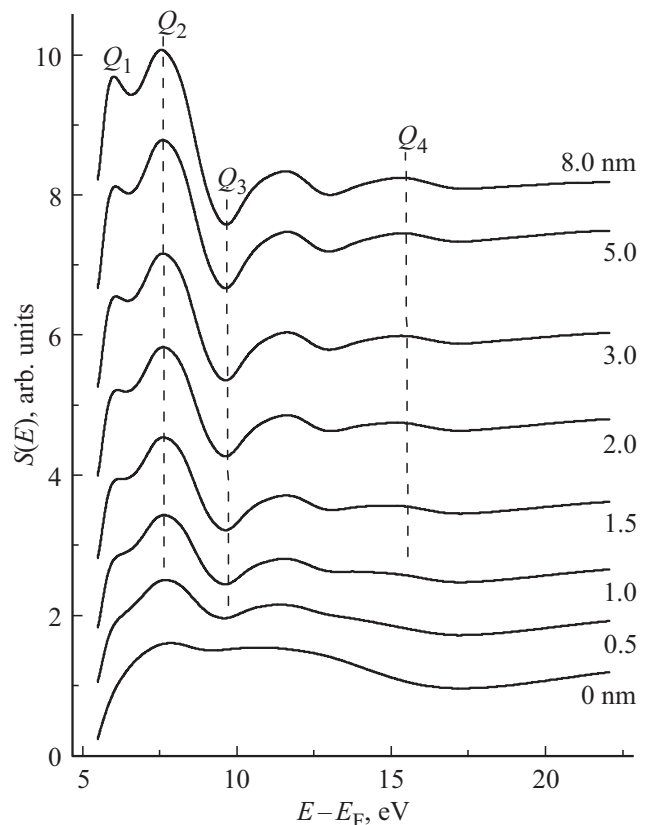


Рис. 4. Серия ТССПТ в процессе осаждения пленок $4Q$ на поверхность $(\text{SiO}_2)_n\text{-Si}$. Подписи около кривых указывают соответствующую толщину органического покрытия от 0 до 8 nm. Максимумы ТССПТ пленок $4Q$ Q_1 – Q_4 расположены при тех же значениях энергии, что и в случае CdS-подложки. Вертикальные штриховые линии показаны для удобства сравнения положений максимумов.

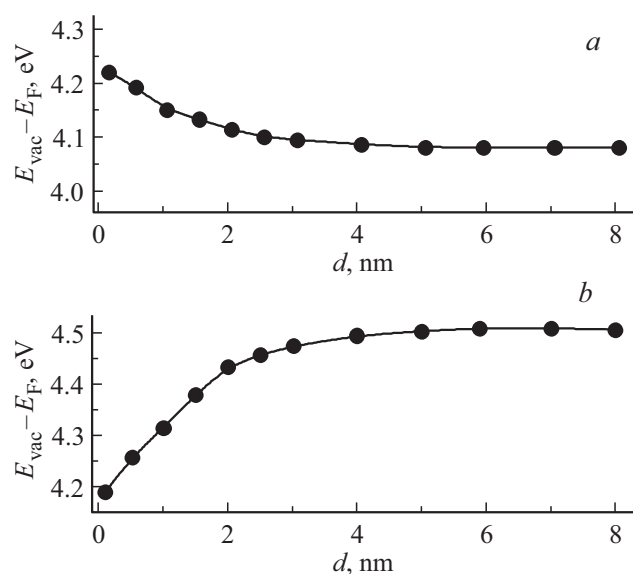


Рис. 5. Изменение положения уровня вакуума E_{vac} относительно E_F в зависимости от толщины осажденного слоя $4Q$ на подложку (a) CdS и (b) $(SiO_2)_n$ -Si на основе результатов TCS-измерений.

Анализ формирования потенциального барьера в процессе осаждения пленки $4Q$ на поверхности исследованных подложек производили путем измерения энергетического положения первичного TCS-максимума. С учетом результатов калибровки энергетической шкалы TCS-инструмента были установлены изменения значения E_{vac} исследованной поверхности относительно E_F при осаждении пленки $4Q$ на обе исследованные подложки (рис. 5). Погрешность определения значений $E_{vac} - E_F$ составляет 0.1 eV вследствие разброса энергий электронов в тестирующей пучке. Значения работы выхода обеих поверхностей CdS и $(SiO_2)_n$ -Si оказались одинаковыми 4.2 ± 0.1 eV, что является совпадением, по мнению авторов. Действительно, для кристаллической поверхности CdS ранее было установлено значение работы выхода 4.4 eV [31]. В случае CdS-слоя, приготовленного методом ALD, значение работы выхода может несколько отличаться. Отметим, что обнаружено отличие и в отношении концентраций атомов Cd и S, согласно результатам XPS-исследований. Значение $E_{vac} - E_F$ 4.2 ± 0.1 eV является характерным для поверхности $(SiO_2)_n$ -Si с учетом проведенной предварительной очистки [16,33]. Несколько меньшие значения работы выхода этой поверхности, 4.0 ± 0.1 eV, были зарегистрированы нами ранее [15]. Это различие, скорее всего, обусловлено отклонениями в процедуре предварительной очистки.

В результате осаждения пленки $4Q$ на поверхность CdS обнаружено незначительное снижение работы выхода, на 0.1 eV (рис. 5, a). При осаждении пленки $4Q$ на поверхность $(SiO_2)_n$ -Si обнаружено повышение значений $E_{vac} - E_F$ до 4.5 ± 0.1 eV (рис. 5, b). Повышение значений

$E_{vac} - E_F$ соответствует переносу электронного заряда из $(SiO_2)_n$ -Si подложки в $4Q$ -пленку, что наблюдалось нами и другими авторами ранее в пограничной области пленок олигомеров фенилена [15,34]. Отметим, что экспериментально установленные значения работы выхода пленок $4Q$ различаются в случае формирования пленки на CdS и на $(SiO_2)_n$ -Si-подложке. Согласно литературным данным, при отсутствии взаимодействия на границе подложка/органическая пленка значение работы выхода не зависит от выбора подложки [35,36]. Часто значение работы выхода приходит к насыщению в достаточно узком слое органического покрытия, толщиной 1–3 nm. Авторы предполагают, что наблюдаемые различающиеся между собой значения работы выхода пленок $4Q$ обусловлены формированием поляризационного слоя на границе пленки и подложки [36–38], диффузией молекул из газовой фазы или диффузией атомов подложки в органическую пленку [28,30].

4. Выводы

Методом термического вакуумного осаждения сформированы пленки олигофенилена 4-кватерфенила на поверхности CdS, сформированной методом ALD, и на поверхности окисленного кремния. XPS-анализ показал, что соотношение атомных концентраций Cd и S в составе приготовленного слоя CdS толщиной 75 nm составило 1 : 1. Путем измерений методом TCS в процессе формирования покрытия 4-кватерфенила толщиной до 8 nm установлено формирование структуры максимумов незаполненных электронных состояний. Максимумы расположены в энергетическом диапазоне от 5 до 20 eV выше E_F , их расположение воспроизводимо при использовании двух выбранных материалов подложки. Установлено незначительное снижение работы выхода, от 4.2 до 4.1 eV, в процессе термического осаждения 4-кватерфенила на поверхность CdS. При осаждении пленки 4-кватерфенила на поверхность окисленного кремния обнаружено повышение значений работы выхода от 4.2 до 4.5 eV. Повышение значений работы выхода соответствует переносу электронного заряда из Si подложки в пленку 4-кватерфенила.

Финансирование работы

TCS-исследования пленок 4-кватерфенила на кремнии выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-13-00021. Исследования поверхности сформированного CdS выполнены при поддержке гранта РФФИ (20-03-00026). В работе использовали оборудование Научного парка СПбГУ „Физические методы исследования поверхности“, „Инновационные технологии композитных наноматериалов“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.A. Attia, M.M. Saadeldin, H.S. Soliman, A.-S. Gadallah, K. Sawaby. *Opt. Mater.* **62**, 711 (2016).
- [2] M.S. Kazantsev, V.G. Konstantinov, D.I. Dominskiy, V.V. Bruevich, V.A. Postnikov, Y.N. Luponosov, V.A. Tafenko, N.M. Surin, S.A. Ponomarenko, D.Y. Paraschuk. *Synt. Met.* **232**, 60 (2017).
- [3] В.А. Постников, М.С. Лясникова, А.А. Кулишов, В.В. Гребенев, О.В. Борщев. *ЖФХ* **93**, 1362 (2019).
- [4] V.A. Postnikov, Y.I. Odarchenko, A.V. Iovlev, V.V. Bruevich, A.Y. Pereverzev, L.G. Kudryashova, V.V. Sobornov, L. Vidal, D. Chernyshov, Y.N. Luponosov, O.V. Borshchev, N.M. Surin, S.A. Ponomarenko, D.A. Ivanov, D.Y. Paraschuk. *Cryst. Growth Des.* **14**, 1726 (2014).
- [5] 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).
- [6] А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, Д.А. Кириленко, Л.Б. Матюшкин, В.А. Мошников. *ФТТ* **61**, 388 (2019).
- [7] П.С. Крылов, А.С. Берестяников, С.А. Феллов, А.С. Комолов, А.Н. Алешин. *ФТТ* **58**, 2476 (2016).
- [8] A.A.A. Darwish. *Infrared Phys. Technology* **82**, 96 (2017).
- [9] P.G. Schroeder, M.W. Nelson, B.A. Parkinson, R. Schlaf. *Surf. Sci.* **459**, 349 (2000).
- [10] P. Shen, M. Huang, J. Qian, J. Li, S. Ding, X.-S. Zhou, B. Xu, Z. Zhao, B.Z. Tang. *Angew. Chem. Int. Ed.* **59**, 4581 (2020).
- [11] J.R. Bakke, H.J. Jung, J.T. Tanskanen, R. Sinclair, S.F. Bent. *Chem. Mater.* **22**, 4669 (2010).
- [12] N.P. Dasgupta, X. Meng, J.W. Elam, A.B.F. Martinson. *Acc. Chem. Res.* **48**, 341 (2015).
- [13] H. Frankenstein, C.Z. Leng, M.D. Losego, G.L. Frey. *Organic Electron.* **64**, 37 (2019).
- [14] 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).
- [15] А.С. Комолов. *ЖТФ* **76**, 13 (2006).
- [16] A.S. Komolov, E.F. Lazneva, S.N. Akhremtchik, N.S. Chepilko, A.A. Gavrikov. *J. Phys. Chem. C* **117**, 24, 12633 (2013).
- [17] 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).
- [18] S.A. Pshenichnyuk, A. Modelli, E.F. Lazneva, A.S. Komolov. *J. Phys. Chem. A* **120**, 2667 (2016).
- [19] S.A. Pshenichnyuk, A. Modelli, N.L. Asfandiarov, E.F. Lazneva, A.S. Komolov. *J. Chem. Phys.* **151**, 214309 (2019).
- [20] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, А.И. Романычев. *ФТТ* **58**, 1398 (2016).
- [21] B. Handke, L. Klita, W. Niemiec. *Surf. Sci.* **666**, 70 (2017).
- [22] И.А. Аверин, А.А. Карманов, В.А. Мошников, И.А. Пронин, С.Е. Игошина, А.П. Сигаев, Е.И. Теруков. *ФТТ* **12**, 2304 (2015).
- [23] I.V. Olenych, O.I. Aksimentyeva, L.S. Monastyrskii, Y.Y. Horbenko, M.V. Partyka, A.P. Luchechko, L.I. Yarytska. *Nanoscale Res. Lett.* **11**, 43 (2016).
- [24] L. Grzadziel, M. Krzywiecki, G. Genchev, A. Erbe. *Synth. Met.* **223**, 199 (2017).
- [25] F. Moulder, W.F. Stickle, P.E. Sobol, K. Bomben. *Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy*. 2nd ed. / Ed. J. Chastain. Eden Prairie: Perkin-Elmer Corporation (Physical Electronics) (1992).
- [26] A.S. Komolov, E.F. Lazneva, S.N. Akhremtchik. *Appl. Surf. Sci.* **256**, 2419 (2010).
- [27] I. Bartos. *Progr. Surf. Sci.* **59**, 197 (1998).
- [28] J. Hwang, A. Wan, A. Kahn. *Mater. Sci. Eng. R* **64**, 1 (2009).
- [29] 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).
- [30] A.S. Komolov, S.N. Akhremtchik, E.F. Lazneva. *Spectrochim. Acta A* **798**, 708 (2011).
- [13] A.S. Komolov, P.J. Moeller. *Colloids and Surfaces A* **239**, 49 (2004).
- [32] A.S. Komolov, P.J. Moeller. *Appl. Surf. Sci.* **212**, 497 (2003).
- [33] А.С. Комолов, Э.Ф. Лазнева, Н.Б. Герасимова, В.С. Соболев, Ю.А. Панина, С.А. Пшеничнюк, Н.Л. Асфандиаров, В. Handke. *ФТТ* **62**, 1245 (2020).
- [34] W. Belza, K. Szajna, M. Kratzer, D. Wrana, K. Cieslik, M. Krawiec, C. Teichert, F. Krok. *J. Phys. Chem. C* **124**, 5681 (2020).
- [35] A.L. Shu, W.E. McClain, J. Schwartz, A. Kahn. *Organic Electron.* **15**, 2360 (2014).
- [36] S. Braun, W. Salaneck, M. Fahlman. *Adv. Mater.* **21**, 1450 (2009).
- [37] 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).
- [38] M. Gruenewald, L.K. Schirra, P. Winget, M. Kozlik, P.F. Ndione, A.K. Sigdel, J.J. Berry, R. Forker, J.-L. Brédas, T. Fritz, O.L.A. Monti. *J. Phys. Chem. C* **119**, 4865 (2015).

Редактор Д.В. Жуманов