

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ NANOTECHNOLOGY

УДК [535.376+621.383]:[621.315.592.9+544.023]

## Узкоспектральные фоточувствительные структуры на основе J-агрегатов цианиновых красителей

*И.В. Федоров, А.В. Ромашкин, А.В. Емельянов,  
В.К. Неволин, И.И. Бобринецкий*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

## Narrow-Spectrum Photosensitive Structures Based on J-Aggregates of Cyanine Dyes

*I.V. Fedorov, A.V. Romashkin, A.V. Emelianov,  
V.K. Nevolin, I.I. Bobrinetskiy*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Исследованы процессы создания узкоспектральных фоточувствительных структур на основе J-агрегатов цианиновых красителей. Предложены два технологических подхода: электрокинетическое осаждение одиночных J-агрегатов в планарной конфигурации электродов и создание многослойных структур с чувствительным слоем из пленки J-агрегатов цианинового красителя и прозрачным электродом из проводящей сетки углеродных нанотрубок на гибкой подложке полиэтиленнафталата.

*Ключевые слова:* J-агрегаты; цианиновые красители; самоорганизация; углеродные нанотрубки; фотодетекторы.

The processes of creating the narrow-spectrum photosensitive structures have been investigated. Two technological approaches based on the J-aggregates of cyanine dyes have been proposed: the electro-kinetic deposition of single J-aggregates in the planar configuration of electrodes and the creation of the multi-layer structures with the photosensitive layer from the film of the cyanine dye J-aggregates and transparent electrode from the conductive carbon nanotube network on the flexible substrate of polyethylene phthalate.

*Keywords:* J-aggregates; cyanine dyes; self-organization; carbon nanotubes; photodetectors.

**Введение.** Наноразмерные супрамолекулярные ансамбли характеризуются оптическими, электрическими, эмиссионными свойствами, значительно превосходящими аналогичные свойства молекул, из которых они состоят. На сегодняшний день наиболее перспективное направление – создание устройств фотоники и электроники на основе

© И.В. Федоров, А.В. Ромашкин, А.В. Емельянов, В.К. Неволин, И.И. Бобринецкий, 2016

структурированных супрамолекулярных образований [1]. Такие устройства имеют высокую эффективность за счет усиления электрооптических свойств при переходе от молекулы к структурированным молекулярным образованиям [2]. Одним из примеров самоорганизации со значительным изменением физических характеристик является J-агрегация цианиновых (полиметиновых) красителей (ЦК) [3]. Уникальные нелинейные оптические свойства ЦК обуславливают возможность широкого применения данных органических систем в фотовольтаике и электролюминофорах [4–10].

В настоящей работе исследуются методы интеграции J-агрегатов в существующую технологическую базу стандартной неорганической электроники, проводятся эксперименты по созданию планарных структур с одиночными лентами J-агрегатов ЦК, осаждаемых на контакты устройства из раствора под действием переменного электрического поля по методике диэлектрофореза. Для повышения воспроизводимости характеристик структур предлагается метод осаждения пленки ЦК, при котором упорядоченные структуры J-агрегатов могут формироваться непосредственно на поверхности подложки. При этом используется тонкая пленка из углеродных нанотрубок в качестве не только материала для создания прозрачных электродов [11], но и непосредственно чувствительного элемента [12], а также подложки, на которой возможно формирование самоупорядоченных структур J-агрегатов, аналогичных формируемым в растворе.

**Методика эксперимента.** В экспериментах использовался ЦК тиамонетинцианин (ТС). Процесс образования J-агрегатов красителя происходит непосредственно в водном растворе красителя, постепенно, с формированием изначально устойчивых соединений двух молекул красителя – димеров – и последующего их объединения в большие упорядоченные образования.

С целью образования матрицы для стимулированного роста фазы J-агрегатов в раствор вводилась добавка катионного полиэлектролита поли-N,N-диметил-N,N-диаллил-аммонийхлорида (PDAC). Используемый для исследований краситель синтезирован в ГОСНИИФОТОХИМПРОЕКТ (г. Москва). Катионный полиэлектролит PDAC предоставлен ОАО «Каустик» (г. Стерлитамак).

Рассмотрим два технологических подхода к созданию фоточувствительных устройств узкого спектрального диапазона на основе структур J-агрегатов ЦК.

Первый подход – создание фотоприемного устройства (рис.1,*a*) на основе J-агрегатов ЦК в планарной конфигурации, изготовленного с применением традиционной микроэлектронной технологии. Суть технологии такова. Между микроскопическими контактами на подложке под действием переменного электрического поля определенной частоты ориентированным образом осаждаются одиночные ленты J-агрегата (диэлектрофорез из раствора). Методика диэлектрофореза и подробное описание установки по электрокинетическому осаждению приведены в работе [13]. Процедура подготовки образцов, раствора, а также матричного каркаса для стимулированного роста J-агрегатов полностью соответствует процедуре, описанной в работе [14].

Методом диэлектрофореза осаждение J-агрегатов проводилось в системе типа «крест» (см. рис.1,*a*). При осаждении по методике диэлектрофореза переменное синусоидальное напряжение подается между двумя противоположными контактами. В большинстве случаев выбраны контакты с меньшим удалением ~ 2 мкм. Амплитудное значение напряжения составляло от 5 до 10 В, частота колебаний напряжения подбиралась на генераторе в диапазоне 5–30 кГц. На электроды микролитровым дозатором наносился приготовленный раствор цианинового красителя с добавкой PDAC в пропорции 1 масс. % на  $5 \cdot 10^{-4}$  моль ТС.

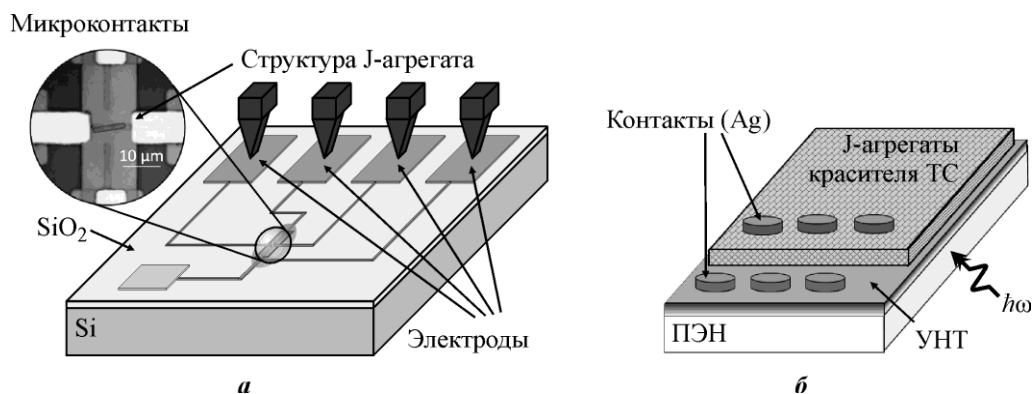


Рис. 1. Конфигурации планарной (а) и вертикальной (б) организации фоточувствительной структуры на основе J-агрегатов

Далее осуществлялась подача переменного напряжения в течение определенного времени до полного высыхания раствора. По окончании осаждения проводился отжиг образцов при температуре 120 °С и атмосферном давлении в течение 4 мин с целью удаления остаточной воды с поверхности. Затем измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) и фотоиндуцированная проводимость образцов в различных конфигурациях контактов. Структуры, показавшие наличие фотоиндуцированной проводимости, в дальнейшем исследовались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния.

При втором технологическом подходе исследованная конфигурация фотоприемного устройства на основе J-агрегатов представляет собой структуру, состоящую из нескольких функциональных слоев: подложка полиэтиленафталата (ПЭН) толщиной 125 мкм, предварительно сформированная на ней проводящая сетка углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве нижнего контакта, пленка цианинового красителя, на которую методом магнетронного распыления наносится верхний серебряный контакт. Также для нескольких образцов при формировании контактов использовалась серебряная паста. Пленка карбоксилированных УНТ (с карбоксильными группами 1–3 масс. % производства Sigma-Aldrich является прозрачным (поглощение в среднем 17 %) проводящим (поверхностное сопротивление  $\sim 1$  кОм/□) и гибким электродом с работой выхода 4,9–5,1 эВ [15]. Пленка красителя формируется при осаждении капельным путем концентрированного водного раствора ТС с оптимальной концентрацией в экспериментах  $(3\text{--}4)\cdot 10^{-3}$  М. Топография слоев фоточувствительного элемента на различных стадиях его изготовления представлена на рис. 1, б. Процедура приготовления образцов соответствует процедуре, приведенной в работе [16].

**Результаты и их обсуждение. Фотодетектор на одиночной ленте J-агрегата.** В проведенных сериях экспериментов на каждом этапе осуществлялся промежуточный контроль методами спектрофотометрии и АСМ. Спектр поглощения растворов красителя измерялся на просвет в стеклянных кюветах. На рис. 2 приведены спектры поглощения раствора ТС в различной концентрации.

Для тиакрбоцианиновых красителей при J-агрегации справедливо увеличение длины волны поглощения в ряду димеры–мономеры–J-агрегаты (батохромный сдвиг) [3]. Характерные полосы поглощения ТС составляют для мономеров (М-полоса) 432 нм, димеров (D-полоса) 413 нм и J-агрегатов (J-полоса) 467 нм. При этом добавление навески PDAC в раствор необратимо смещает равновесие в сторону J-фазы. Результаты контрольных АСМ-исследований пленок красителей, осажденных из растворов на поверхность скола слюды, выявили наличие характерной структуры J-агрегатов в виде лент латеральных размеров 2–10 мкм, высотой 2–4 нм (рис. 3). При добавлении раствора PDAC наблюдается образование островковых пленок толщиной 2–4 нм.

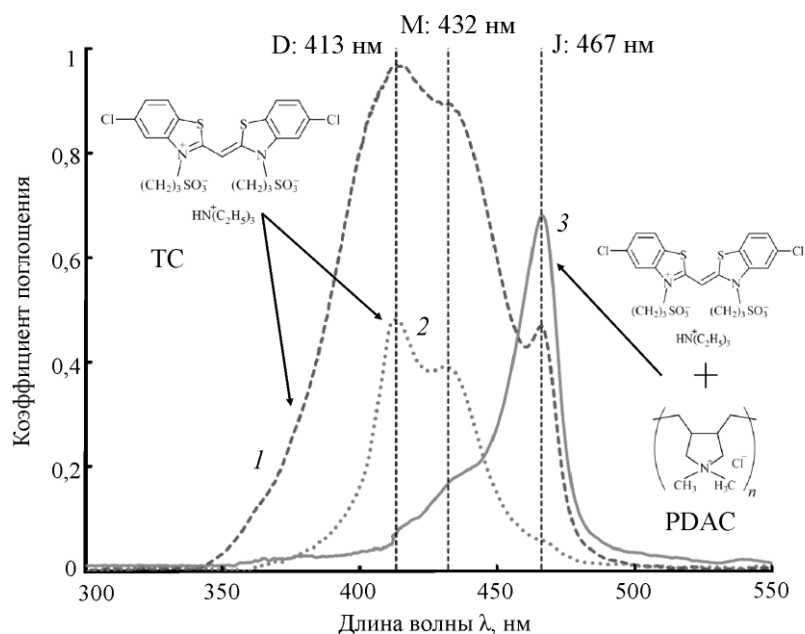


Рис.2. Спектр поглощения ТС в различной концентрации: 1 –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  М; 2 –  $0,5 \cdot 10^{-5}$  М; 3 –  $0,5 \cdot 10^{-5}$  М при массовой доле в растворе катионного полимера PDAC 0,01 %

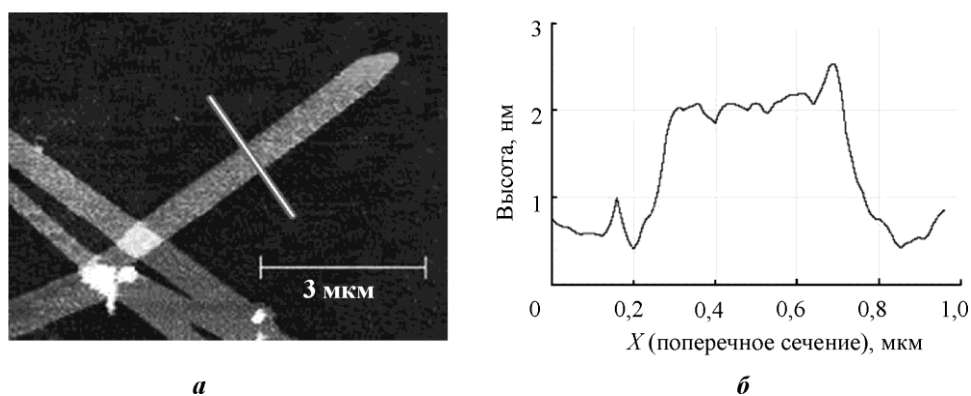


Рис.3. АСМ-изображение J-агрегатов ТС на поверхности слюды непосредственно после осаждения из раствора: а – топография (линией показана секущая плоскости); б – профиль сечения

Одиночная структура J-агрегата вследствие упорядоченной ориентации одиночных молекул красителя характеризуется значительным статическим и переходным дипольным моментом [17]. Следует ожидать упорядоченную ориентацию и преимущественное осаждение J-агрегатов в области электродов с приложенным переменным электрическим полем, где имеется наибольший его градиент. В проведенных экспериментах зазор составлял 2,5–3 мкм, напряженность поля между электродами  $(2-5) \cdot 10^6$  В/м.

Измерены ВАХ полученных в результате эксперимента структур типа «крест» с нанесенными из раствора по методике диэлектрофореза лентами J-агрегатов (рис.4).

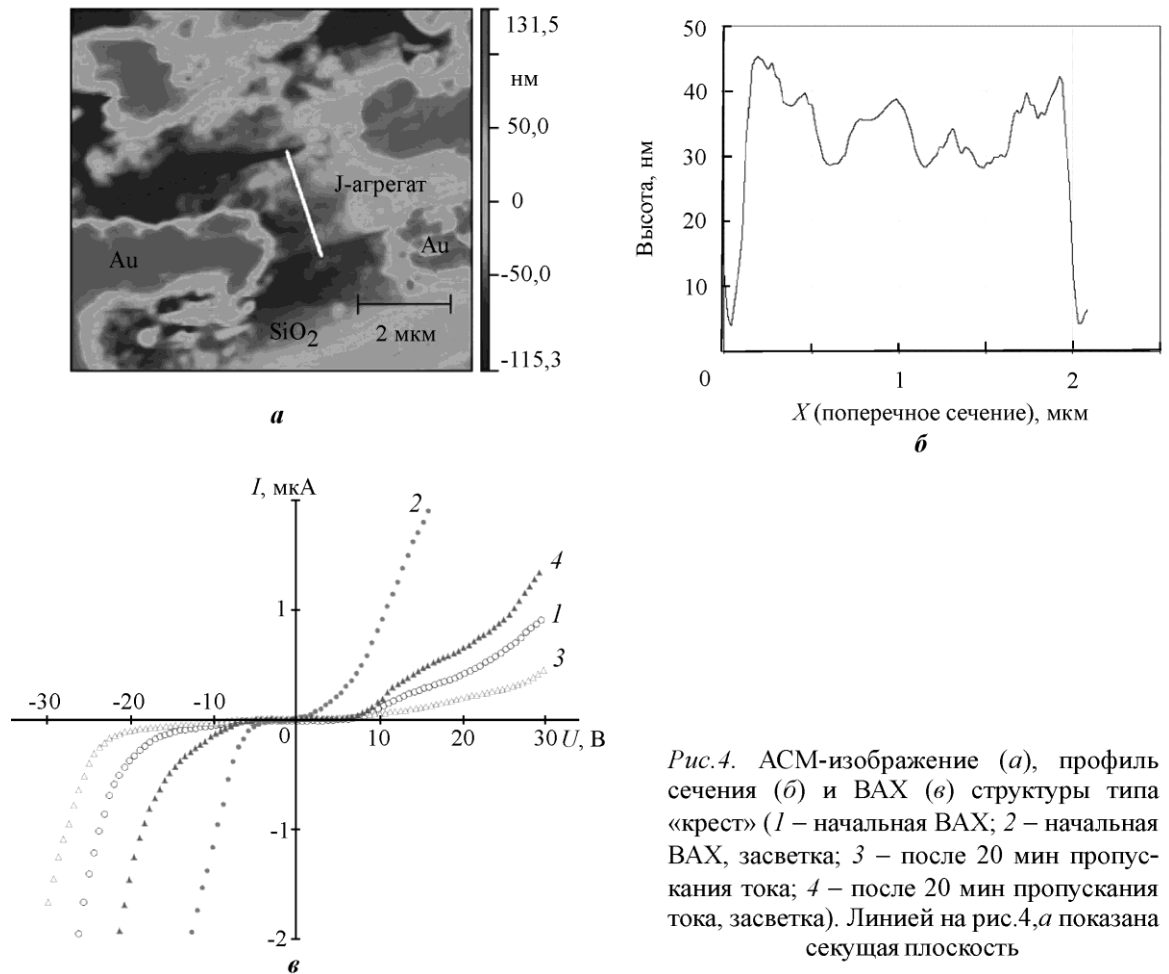


Рис.4. АСМ-изображение (а), профиль сечения (б) и ВАХ (в) структуры типа «крест» (1 – начальная ВАХ; 2 – начальная ВАХ, засветка; 3 – после 20 мин пропускания тока; 4 – после 20 мин пропускания тока, засветка). Линией на рис.4,а показана секущая плоскость

Исследованы изменения ВАХ при экспонировании светом видимого диапазона (рис.4,в). Из рисунка видно, что проводимость структуры сильно изменяется при экспонировании. Также имеет место значительная деградация образцов. Асимметрия кривых 1–4 относительно нуля (крутизна ВАХ больше в области отрицательных напряжений) объясняется неравномерным осаждением структур на электроды. Это происходит из-за того, что в процессе диэлектрофореза первый электрод имеет синусоидально изменяющийся потенциал, в то время как второй электрод заземлен. При засветке наблюдается заметное уменьшение порогового напряжения (возникает ток порядка 0,1 мкА с существенным изменением угла наклона ВАХ) от значения около 8–10 В при положительной полярности практически до нуля при первичном снятии ВАХ. С течением времени этот эффект ослабевает. Данное поведение указывает на существенные изменения в транспорте заряда при засветке в области контактов J-агрегат – Au вследствие формирования в областях контакта сильных электрических полей и плотностей токов, а также, возможно, и в самом J-агрегате с протеканием тока.

После измерения ВАХ проведен анализ топографии образцов методом АСМ. Выяснено, что во всех структурах, показывающих фотомодуляцию проводимости, наблюдается перекрытие электродов структурами J-агрегатов (рис.4,а,в). Даже при неполном перекрытии/касании электрода изменение проводимости имеет величину порядка темновой проводимости образца. Также наличие структур J-агрегатов в зазоре между кон-

тактами исследуемых структур было подтверждено проведенной на масштабе нескольких микрон конфокальной спектроскопией комбинационного рассеяния.

Высота лент J-агрегатов от образца к образцу изменяется в диапазоне 20–60 нм, средняя высота по всем образцам составляет 30 нм. Этот результат значительно превышает данные анализа высот структур J-агрегатов ТС на образце слюды (2–5 нм), что объясняется значительно большей концентрацией раствора при проведении диэлектрофореза, а также влиянием материала подложки.

**Конфигурация с несколькими функциональными слоями.** Планарная конфигурация фоточувствительной структуры из одиночных лент J-агрегатов проста в исполнении, однако имеет малое время жизни в атмосферных условиях и недостаточную воспроизводимость. Поэтому проводились эксперименты по созданию гетероструктур с фоточувствительным слоем в виде осажденной пленки J-агрегатов красителя между двумя электродами на гибкой подложке.

В результате осаждения проводящей сетки УНТ и затем осаждения пленки красителя ТС в форме J-агрегата получены образцы светочувствительных структур. При этом коэффициент экстинкции составил  $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  для максимума поглощения на длине волны  $\lambda = 465 \text{ нм}$ . Коэффициент экстинкции рассчитывался исходя из измеренного спектра поглощения для структуры и измеренной методом АСМ средней толщины слоя красителя. Для раствора, из которого проводилось осаждение, значение коэффициента экстинкции равно  $2 \cdot 10^5 \text{ М}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  на пике поглощения J-агрегатов красителя. Спектр поглощения раствора красителя ТС, использовавшегося для осаждения, а также спектр его фотолюминесценции при возбуждении от диода с длиной волны максимума интенсивности  $\lambda = 465 \text{ нм}$ , с большой точностью соответствующего пику поглощения J-формы красителя ТС, показаны на рис. 5. Здесь же представлены спектры поглощения сформированной структуры на подложке ПЭН и спектр ее фотолюминесценции при возбуждении от того же диода. При этом чистая подложка ПЭН, а также образованная пленка УНТ не имеют характерных пиков поглощения.

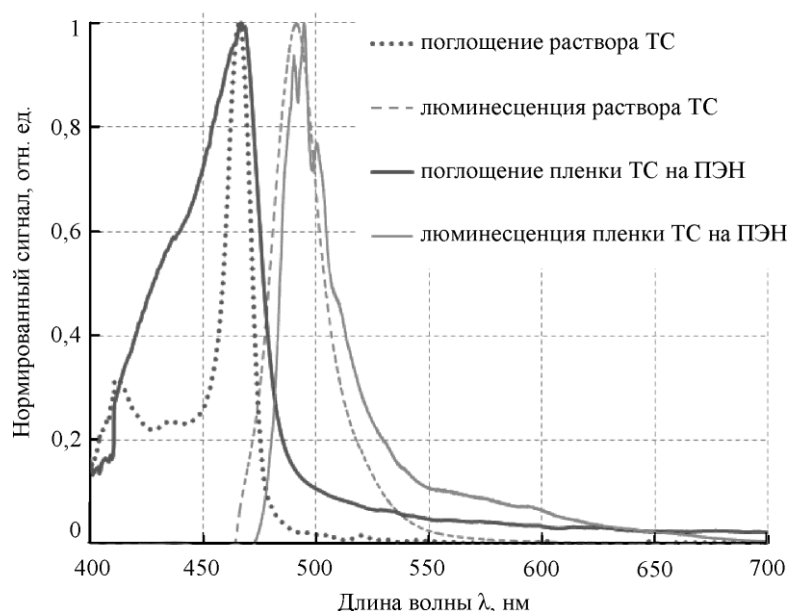


Рис.5. Спектр поглощения и люминесценции раствора красителя ТС и структуры после осаждения ТС из раствора (до нанесения электродов)

Сравнительный анализ графиков на рис. 5 показывает уширение пиков поглощения и люминесценции при осаждении красителя из раствора на поверхности подложки. Положения пиков люминесценции и поглощения при этом для раствора красителя и полученной пленки в достаточной степени совпадают в отличие от результатов, полученных другими группами [7]. Вероятно, сохранение пиков при осаждении имеет место благодаря использованию стабильного и не демонстрирующего пространственную изомерию и Н-агрегацию [18] монометинового красителя ТС в сочетании с гидрофильной пленкой функционализированных УНТ на ПЭН. Аналогичные результаты получены и на чистом ПЭН, поверхность которого также содержит полярные С=О группы и углеродный скелет в виде бензольных колец.

Проведенные АСМ-исследования показывают наличие характерных ламелей красителя в структуре (рис. 6). При этом средняя высота ламелей (лент) составляет 35 нм над поверхностью пленки, а их ширина сильно варьируется в диапазоне 200–800 нм. Даже в масштабах нескольких микрон ламели ориентированы случайным образом без предпочтительного направления их выстраивания. Поэтому ожидается изотропия электрооптических свойств пленки в плоскости образца.

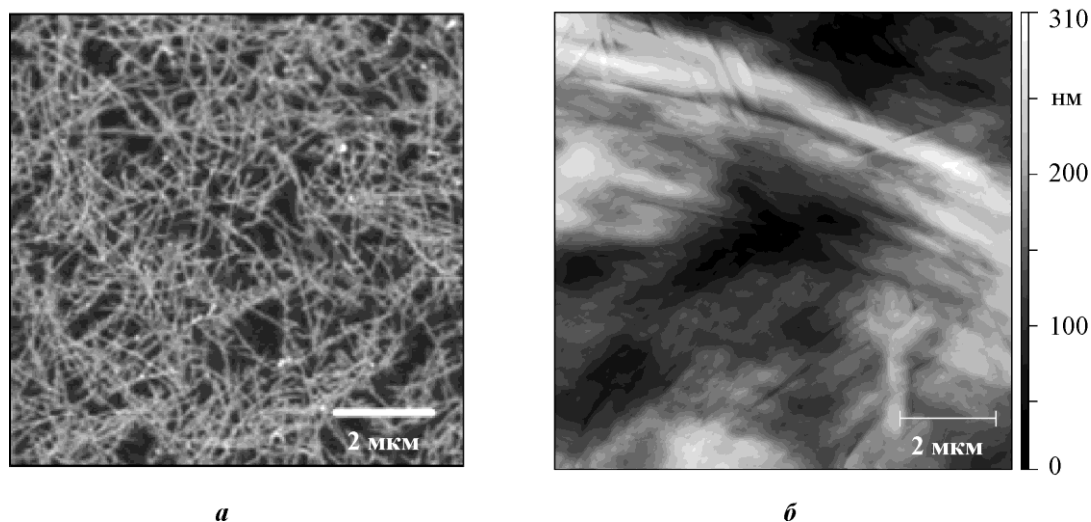


Рис. 6. Топография слоев фоточувствительного элемента на различных стадиях его изготовления: *а* – изображение во вторичных электронах проводящей сетки УНТ на подложке ПЭН после проведения трех циклов нанесения УНТ; *б* – АСМ-топография поверхности образца на поверхности ПЭН после нанесения красителя ТС на сформированную пленку УНТ

Измерены серии ВАХ после осаждения пленки красителя, его последующей сушки и нанесения серебряных контактов. В измерениях проводящая сетка УНТ являлась анодом, серебряные электроды – катодами. На рис. 7, *а* показаны графики зависимости проводимости структуры при изменении поверхностной мощности падающего излучения для двух значений напряжения смещения  $U = \pm 8$  В. Зависимость носит линейный характер. Различия кривых, представленных на графике, преимущественно объясняется асимметричной зонной диаграммой образца, имеющего с одной стороны контакт агрегатов красителя (ВЗМО (НОМО)  $-5,6...-5,8$  эВ и НСМО (LUMO)  $-2,8...-3,0$  эВ) с УНТ (работа выхода около 4,9 эВ), с другой стороны – с серебряным электродом (работа выхода 4,3 эВ). В образцах различие значений тока при одинаковых абсолютных величинах напряжения составляет не более 15 %, что указывает на слабую роль электрокинетических процессов в высушенной пленке. Следует отметить, что на масштабе времени 20–40 мин как при пропуске тока, так при засветке деградации образцов замечено не было.

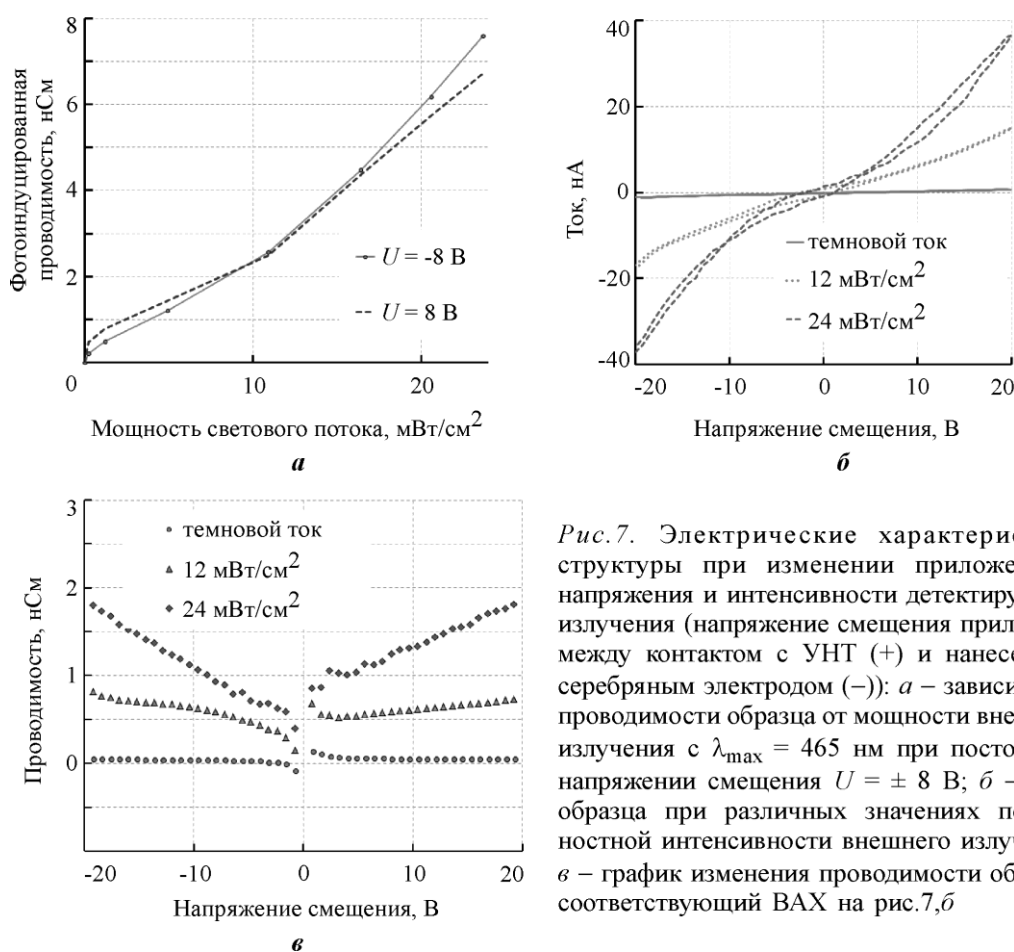


Рис.7. Электрические характеристики структуры при изменении приложенного напряжения и интенсивности детектируемого излучения (напряжение смещения приложено между контактом с УНТ (+) и нанесенным серебряным электродом (-)): а – зависимость проводимости образца от мощности внешнего излучения с  $\lambda_{\text{max}} = 465$  нм при постоянном напряжении смещения  $U = \pm 8$  В; б – ВАХ образца при различных значениях поверхностной интенсивности внешнего излучения; в – график изменения проводимости образца, соответствующий ВАХ на рис.7,б

Приведенная на рис.7,б зависимость ВАХ от мощности падающего излучения светодиода показывает чувствительность полученной структуры к излучению узкого спектрального диапазона поглощения пленки J-агрегатов: при возрастании интенсивности излучения (освещенность  $E_e$ ) с нуля до уровня  $24$  мВт/см<sup>2</sup> протекающий в структуре ток увеличился с 1 до 40 нА. Наличие петли гистерезиса на графике ВАХ может быть связано с не полностью удаленным при нагреве подложки в вакууме при температуре  $65$  °С растворителем и высокой концентрацией ловушек в агрегированном материале красителя [18]. На рис.7,в приведен график изменения проводимости образца при изменении напряжения смещения и различных уровнях освещенности образца. Исходя из общего вида зависимостей, показанных на рис. 7, абсолютная величина фототока пропорциональна квадрату приложенного напряжения и увеличивается линейно с освещенностью образцов.

Приложенное к структуре напряжение при отсутствии освещения не приводит к образованию неравновесных носителей заряда в слое J-агрегатов, и регистрирование протекания тока в структуре может быть связано лишь с ее освещением источником с длиной волны в диапазоне  $(465 \pm 20)$  нм.

Для измеренных образцов наблюдается общая закономерность: внешняя квантовая эффективность растет при увеличении интенсивности излучения. Это может быть вызвано большей эффективной глубиной проникновения излучения в глубь слоя J-агрегатов. Ток в структуре увеличивается за счет как увеличения числа носителей

пропорционально интенсивности излучения, так и уменьшения эффективного сопротивления структуры при уменьшении толщины слоя незасвеченного красителя, являющегося барьером на пути движения носителей заряда.

Внешнюю квантовую эффективность структуры можно повысить за счет как создания пленок J-агрегатов меньшей толщины (уменьшается толщина барьерного слоя незасвеченного красителя), так и образования структурированных в макромасштабах пленок J-агрегатов (увеличивается подвижность носителей в структуре агрегатов).

**Заключение.** Полученные в работе структуры с чувствительным слоем из J-агрегатов ТС показывают изменения проводимости при их освещении коротковолновым видимым светом в диапазоне 450–480 нм. При этом характерное время жизни увеличивается относительно планарного метода осаждения электрофорезом, что может быть также связано с изменением материала подложки.

Обнаружено наличие фотопроводимости в индивидуальных лентах J-агрегатов толщиной 30 нм и длиной до 4 мкм. При этом отношение фототока к темновому току  $I/I_0 = 6,3$  для напряжения сток–исток 10 В. Однако характеристики данных структур значительно деградируют под влиянием как излучения, так и значительной напряженности электрического поля.

Показано, что более устойчивой к деградации является структура гетероперехода, образованного электродом из проводящих сеток углеродных нанотрубок и светочувствительного слоя, состоящего из J-агрегатов цианинового красителя ТС. В данных структурах обнаружен фоторезистивный эффект. Благодаря узкому пику поглощения J-агрегатов созданные многослойные структуры демонстрируют светочувствительность в узком спектральном диапазоне с линейным увеличением тока, проходящего через структуру, при увеличении интенсивности падающего на структуру излучения. При этом увеличение тока возможно на два порядка относительно темнового тока. Несмотря на относительно низкую эффективность, продемонстрированную на гибком детекторе на основе данных гетероструктур, конфигурация является многообещающим материалом для использования в органической фотовольтаике.

Авторы выражают благодарность компании ООО НПК «Оптолинк» (г. Москва) за помощь в проведении оптических измерений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-01308, МИЭТ) и гранта Президента Российской Федерации (грант № МД-170.2014.8).*

### *Литература*

1. **Ванников А.В., Гришина А.Д., Мальцев Е.И.** Наноструктурированные полимерные материалы и устройства на их основе // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т. 4. – № 1-2. – С. 52–69.
2. Electroluminescence of polymer/J-aggregate composites / **E.I. Maltsev et al.** // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 75. – P. 1896.
3. **Шаниро Б.И.** Молекулярные ансамбли полиметиновых красителей // Успехи химии. – 2006. – Т. 75. – № 5. – С. 484.
4. **Würthner F., Kaiser T., Saha-Möller C.R.** J-aggregates: from serendipitous discovery to supramolecular engineering of functional dye materials // Angew. Chem. Int. Ed. – 2011. – Vol. 50. – P. 3376–3410.
5. **Lidzey D.G., Bradley D.D.C., Skolnick M.S., Virgili T.** Strong exciton–photon coupling in an organic semiconductor microcavity // Nature. – 1998. – Vol. 395. – P. 53–55.
6. Solid state cavity QED: Strong coupling in organic thin films / **J.R. Tischler, M.S. Bradley, Q. Zhang et al.** // Organ. Electron. – 2007. – Vol. 8. – P. 94–113.
7. Critical electron transfer rates for exciton dissociation governed by extent of crystallinity in small molecule organic photovoltaics / **S. Spencer, J. Cody, S. Misture et al.** // J. Phys. Chem. C. – 2014. – Vol. 27. – P. 14840–14847.

8. Organic field-effect transistors based on J-aggregate thin films of a bisazomethine dye / *J.C. Ribierre, M. Sato, A. Ishizuka et al.* // *Org. Electron.* – 2012. – Vol. 13. – P. 999–1003.
9. **Шаниро Б.И.** «Блочное строительство» агрегатов полиметиновых красителей // *Российские нанотехнологии.* – 2008. – Т. 3. – С. 72–83.
10. **Yao H.** Morphology transformations in solutions: dynamic supramolecular aggregates // *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C.* – 2004. – Vol. 100. – P. 99–148.
11. **Ates E.S., Kucukyildiz S., Unalan H.E.** Zinc oxide nanowire photodetectors with single-walled carbon nanotube thin-film electrodes // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2012. – Vol. 4. – P. 5142–5146.
12. Быстродействующие биологические сенсоры на основе однослойных углеродных нанотрубок, модифицированных специфичными аптамерами / **К.Ф. Ахмадишина, И.И. Бобринецкий, И.И. Комаров и др.** // *Российские нанотехнологии.* – 2013. – Т. 8. – С. 35–39.
13. **Бобринецкий И.И.** Электрофорез в задачах очистки, сепарирования и интеграции углеродных нанотрубок // *Российские нанотехнологии.* – 2010. – Т. 4. – №1-2. – С. 110–114.
14. Photoelectric response of thiamonomethinecyanine J-aggregate nanoribbons deposited via dielectrophoresis technique / **I.V. Fedorov, I.I. Bobrinetskiy, B.I. Shapiro et al.** // *Phys. Lett. A.* – 2014. – Vol. 378. – P. 226–228.
15. **Huang J.-H., Fang J.-H., Liu Ch.-Ch., Chu Ch.-W.** Effective work function modulation of graphene/carbon nanotube composite films as transparent cathodes for organic optoelectronics // *ACS Nano.* – 2011. – Vol. 5. – N. 8. – P. 6262–6271.
16. **Федоров И.В., Емельянов А.В., Ромашкин А.В., Бобринецкий И.И.** Фотодетекторы на основе пленок однослойных углеродных нанотрубок и J-агрегатов тиамонетинцианина на гибком носителе // *Физика и техника полупроводников.* – 2015. – Т. 49. – № 9. – С. 1282–1288.
17. **Czikklely V., Forsterling H.D., Kuhn H.** Extended dipole model for aggregates of dye molecules // *Chem. Phys. Lett.* – 1970. – Vol. 6. – P. 207–210.
18. **Некрасов А.Д., Шаниро Б.И.** Влияние органических полиэлектролитов на H<sup>\*</sup>-агрегацию мезометилзамещенных тиакарбоцианиновых красителей // *Химия высоких энергий.* – 2011. – Т. 45. – С. 162–168.

Статья поступила  
24 июля 2015 г.

**Федоров Игорь Вячеславович** – аспирант, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» (НОЦ «ЗМНТ») МИЭТ. *Область научных интересов:* органическая электроника, нанотехнология, наноэлектроника.

**Ромашкин Алексей Валентинович** – кандидат технических наук, научный сотрудник НОЦ «ЗМНТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* органическая электроника, ионно-лучевое травление, нанотехнология и наноэлектроника.

**Емельянов Алексей Владимирович** – аспирант кафедры квантовой физики и наноэлектроники (КФН) МИЭТ, сотрудник НОЦ «ЗМНТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* квантово-химическое моделирование, органическая электроника, наноэлектроника.

**Неволин Владимир Кириллович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры КФН МИЭТ, руководитель НОЦ «ЗМНТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.  
**E-mail:** vkn@miee.ru

**Бобринецкий Иван Иванович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник НОЦ «ЗМНТ» МИЭТ. *Область научных интересов:* наноэлектроника, бионаноэлектроника, органическая электроника.