Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 7, с. 419 – 426

Углеродные точки на основе трикарбоновых кислот и этилендиамина для органических светоизлучающих диодов[1)]

А. Е. Томская[+*× 2)], *А. А. Ващенко*[○], *С. А. Смагулова*[×], *Е. Д. Образцова*[+*]

[+]*Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия*

[*]*Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия*

[×]*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, 670000 Якутск, Россия*

[○]*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119992 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 28 июля 2025 г.
После переработки 28 августа 2025 г.
Принята к публикации 28 августа 2025 г.

В данном исследовании представлены синтез и характеристика углеродных точек, полученных из трикарбоновых кислот и этилендиамина, которые демонстрируют высокий квантовый выход фотолюминесценции. В процессе синтеза в структуре углеродных точек формируются ковалентно связанные молекулярные флуорофоры 1,2,3,5-тетрагидро-5-оксо-имидазо[1,2-a]пиридин-7-карбоновой кислоты, значительно усиливающие их фотолюминесцентные свойства. Спектры поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях и инфракрасные спектры с преобразованием Фурье подтверждают наличие фрагментов 1,2,3,5-тетрагидро-5-оксо-имидазо[1,2-a]пиридин-7-карбоновой кислоты в структуре углеродных точек. Органический светоизлучающий диод, изготовленный с использованием этих углеродных точек в качестве излучательного слоя, показал яркость до 30 кд/м^2.

DOI: 10.31857/S0370274X25100076, EDN: KAAXEM

1. Введение. Углеродные точки (УТ) представляют собой новый класс углеродных наноматериалов с размерами менее 10 нм, которые привлекают значительное внимание благодаря своим уникальным характеристикам. К ним относятся: интенсивная фотолюминесценция (ФЛ) с высоким квантовым выходом, регулируемая длина волны излучения, отличная растворимость в воде, низкая токсичность, высокая биосовместимость, устойчивость к фотообесцвечиванию, химическая стабильность и возможность модификации поверхности путем пассивации или функционализации [1]. Благодаря этим свойствам УТ рассматриваются как перспективные материалы для различных применений, включая целевую доставку лекарств, биовизуализацию, медицинскую диагностику, катализ, оптоэлектронные устройства и в качестве флуоресцентных меток [1–4]. Их простой и экономичный синтез из органических соединений делает их экологически чистой альтернативой традиционным полупроводниковым квантовым точкам, содержащим тяжелые металлы.

УТ могут быть получены путем фрагментации объемных углеродных материалов в наночастицы с использованием физических или химических подходов (методы “сверху вниз”) с последующей пассивацией или функционализацией поверхности. Альтернативные методы “снизу вверх” основаны на карбонизации органических молекулярных прекурсоров с использованием простых методов, таких как пиролиз, гидротермальная обработка или микроволновое облучение [5].

С 2008 года лимонная кислота (ЛК) стала одним из наиболее широко используемых прекурсоров для синтеза УТ по методу “снизу вверх” [6]. ЛК – это дешевая и широко распространенная в природе трикарбоновая кислота. Ее часто выбирают благодаря простоте одностадийного процесса синтеза и высокому квантовому выходу фотолюминесценции (КВ ФЛ, PL QY – photoluminescence quantum yield) получаемых УТ. Для повышения КВ ЛК комбинируют с другими прекурсорами, вводящими гидроксильные, карбоксильные или гетероатомсодержащие группы (т.е. легирующие агенты) [7, 8]. Пассивация поверхности после синтеза или функционализация органическими молекулами также может повысить КВ ФЛ [8]. Этилендиамин (ЭДА) - органическая молекула с

[1)]См. дополнительный материал к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ru
[2)]e-mail: ae.tomskaya@s-vfu.ru

двумя первичными аминогруппами – часто используется для азотного легирования. Степень замещения азота, количество аминогрупп и длина алкильной цепи азотного прекурсора влияют на КВ ФЛ УТ. Предыдущие исследования показали, что ЭДА дает наибольшее содержание азота (по данным РФЭС) и наибольший КВ ФЛ среди различных аминов [9, 10]. Также было показано, что УТ, синтезированные с ЭДА, имеют более высокий КВ, чем полученные с использованием моноаминных аналогов, таких как этаноламин [10]. Благодаря своей короткой алкильной цепи ЭДА также превосходит более длинноцепочечные предшественники в повышении КВ [11]. ЛК с тремя -COOH группами реагирует с ЭДА при комнатной температуре с образованием полимеров. В гидротермальных условиях эти полимеры подвергаются дегидратации, дегидрированию, конденсации, переносу водорода, изомеризации и циклизации, в конечном итоге образуя полиамиды и молекулярные флуорофоры [12, 13]. Дальнейшая карбонизация этих промежуточных продуктов приводит к образованию УТ – наноразмерных углеродных структур [12]. ФЛ УТ, синтезированных из ЛК и ЭДА, обусловлена изолированными sp^2-гибридизированными доменами, а также молекулами флуорофоров, которые ковалентно связаны со структурой УТ. Дополнительный вклад в ФЛ УТ также вносят пиридиноподобные фрагменты, захваты зарядов в состояниях, связанных с гетероатомами (N, O) и структурные неоднородности.

В настоящем исследовании четыре типа азотлегированных УТ были синтезированы методом гидротермальной обработки с использованием ЭДА в качестве азотного прекурсора и либо ЛК, либо трансаконитовой кислоты в качестве углеродного прекурсора. Хотя комбинация ЛК-ЭДА является одной из наиболее изученных стратегий синтеза [14, 15], данная работа сосредоточена на исследовании оптических свойств УТ, полученных из ТА – еще одного трикарбонового соединения. Дополнительной целью является создание ОСИД-устройств с использованием УТ, синтезированных из обеих кислот, в качестве светоизлучающего слоя (люминофора).

2. Материалы и методы.

2.1. Синтез N-легированных УТ.

2.1.1. Из ЛК и ЭДА. Для синтеза использовали ЛК в качестве углеродного прекурсора и ЭДА в качестве азотного прекурсора. 1.1 грамма порошка ЛК ($C_6H_8O_7$) растворяли в смеси деионизированной воды (13 мл) и ЭДА (7 мл). Мольное соотношение ЭДА:ЛК составляло $\sim$18:1. Раствор затем подвергали ультразвуковой обработке в течение 5–10 мин для получения гомогенной реакционной смеси. После этого раствор переносили в автоклав объемом 25 мл без дополнительного перемешивания. Тефлоновый автоклав с раствором помещали в сушильный шкаф и выдерживали при температуре 220 °C в течение 2 или 4 ч. УТ, синтезированные в течение 2 и 4 ч, обозначали соответственно как CA-2 и CA-4 (CA – означает “citric acid”). Полученный раствор с концентрацией ~ 35 мг $\cdot$ мл$^{-1}$ содержал УТ и другие продукты синтеза. Раствор помещали в диализный мешок (размер пор 1 кДа) и перемешивали в воде с магнитной мешалкой в течение 8 ч для удаления остатков прекурсоров и побочных продуктов реакции. Затем раствор фильтровали через мембраны с размерами пор 100 нм и 10 нм для разделения агрегированных наночастиц УТ. Конечная водная суспензия УТ имела светло-желтый цвет. Концентрация сухого вещества в конечном растворе составляла ~ 6 г $\cdot$ л$^{-1}$.

2.1.2. Из ТА и ЭДА. УТ были синтезированы из ТА по протоколу, идентичному разделу 2.1.1, с заменой ЛК на 0.98 г $C_6H_6O_6$. Полученный раствор имел светло-коричневую окраску, контрастирующую с темно-коричневым оттенком УТ на основе ЛК, что свидетельствует о меньшем выходе наночастиц. Снижение выхода объясняется более высокой температурой плавления ТА (190 °C против 153 °C у ЛК) и частичным термическим разложением ТА в процессе гидротермальной обработки при 220 °C. Концентрация сухого вещества после фильтрации составила ~ 4.7 г $\cdot$ л$^{-1}$. Для физико-химической характеризации и изготовления OLED использовали суспензию с концентрацией ~ 6 г $\cdot$ л$^{-1}$. Концентрацию УТ увеличивали с помощью ротационного испарителя при 40 °C в условиях пониженного давления. Образцы, синтезированные в течение 2 и 4 ч, далее обозначаются как TA-2 и TA-4 соответственно (TA – означает “trans-aconitic acid”).

2.2. Изготовление ОСИД с УТ. Фильтрованную водную суспензию УТ высушивали с использованием роторного испарителя для использования в качестве светоизлучающего слоя в ОСИД. В некоторых случаях при сушке образовывался гелеобразный осадок, который растворяли в метаноле и снова высушивали с помощью роторного испарителя. Конечный сухой порошок растворяли в толуоле при концентрации 6 г $\cdot$ л$^{-1}$.

В качестве анодов использовали оксид индияолова (ITO) на стеклянных подложках с поверхностным сопротивлением 15 Ом/$\square$. Подложки последовательно очищали в ультразвуковой ванне: сначала в растворе NaOH в течение 30 мин, затем в дистиллированной воде в течение 10 мин и, наконец, в изопропаноле в течение 10 мин. После очистки подложки сушили потоком азота (N_2). Через 30 минут проводили ультрафиолетовую обработку для удаления остаточных органических загрязнений.

Все процессы нанесения методом центрифугирования проводили в условиях окружающего воздуха. Слой PEDOT:PSS (поли(3,4-этилендиокситиофен):поли(стиролсульфонат)) толщиной 50 нм наносили на ITO, диспергируя 300 мкл раствора и центрифугируя при 2000 об/мин в течение 1 мин. Полученную пленку отжигали при 120 °C в течение 30 мин. Затем слой поли-TPD (поли(N,N′-бис-4-бутилфенил-N,N'-бисфенил)бензидин) толщиной 20 нм наносили центрифугированием из раствора в хлорбензоле (концентрация $5\,\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) при 2000 об/мин в течение 1 мин и сушили при 220 °C в течение 30 мин. Затем излучательный слой, состоящий из УТ, наносили центрифугированием из раствора в толуоле ($6\,\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$) при 2000 об/мин в течение 1 мин. После нанесения подложки переносили в аргоновый перчаточный бокс, где слои сушили при 120 °C в течение 20 мин. Слой TPBi ($2,2',2''$-(1,3,5-бензинтриил)-трис(1-фенил-1H-бензимидазол)) толщиной около 20 нм, служащий для транспорта электронов и блокировки дырок, наносили методом термического испарения. Затем последовательно наносили слой LiF толщиной ~ 1 нм и катод из алюминия толщиной более 100 нм при вакуумном давлении ниже 10^{-5} мбар.

2.3. Методы характеризации. Спектры инфракрасного поглощения с преобразованием Фурье (FT-IR) получали с использованием спектрофотометра PerkinElmer Spectrum Two. Спектры поглощения регистрировали на спектрометре Shimadzu 3101 PC UV/VIS/NIR. Спектры люминесценции и времена затухания измеряли с использованием спектрометра Fluorolog 3 (Horiba Jobin Yvon), оснащенного охлаждаемым модулем детектирования фотонов PC177CE-010 и фотоумножителем R2658. Ширина щелей возбуждения и излучения составляла 2 нм. Абсолютные квантовые выходы фотолюминесценции измеряли с использованием системы интегрирующей сферы Fluorolog 3 Quanta-φ. Спектры электролюминесценции (ЭЛ) регистрировали с использованием CCD-спектрометра Ocean Optics Maya 2000 Pro, чувствительного в диапазоне 200–1100 нм. Вольт-амперные (I–V) характеристики измеряли с использованием двух цифровых мультиметров DT 838. Измерения яркости проводили с использованием яркомера ТКА-РКМ (ТКА Instruments).

3. Результаты и обсуждение. В предыдущих исследованиях было показано, что УТ, синтезированные из ЛК и ЭДА гидротермальным методом, имеют сферическую форму, латеральные размеры 5–10 нм и толщину слоя наночастиц приблизительно 1 нм [10, 16]. В нашей предыдущей работе мы синтезировали УТ в тех же условиях, что и в настоящем исследовании, используя как ЛК, так и ТА с водным раствором аммиака, и получили латеральные размеры в диапазоне от 3 до 15 нм [17].

Химические связи в наших образцах анализировали с помощью FT-IR спектроскопии путем регистрации спектров пропускания пленок, приготовленных из синтезированных суспензий, нанесенных на подложки из ZnSe (рис. 1). Все образцы демонстрировали схожие спектральные особенности, соответствующие углерод- и кислородсодержащим связям. Общие полосы поглощения, наблюдаемые во всех спектрах, включают колебания O–H и N–H/O–H при 3285 [18] и в диапазоне 3209–3309 см^{-1} [19, 20], колебания C–H при 2936 [21] и 2875 см^{-1} [22], а также деформационные колебания O–H карбоксильных групп при 1324 см^{-1} [3]. Наличие пиков при 1659, 1573–1575 и 1485 см^{-1} указывает на валентные колебания C=C, C=O и C=N в сопряженной структуре [2], валентные колебания C=C [23] и фенильных колец [22]. Пики при 1434 см^{-1} и 1384 см^{-1} соответственно приписываются валентным колебаниям C–N [20] и асимметричному валентному колебанию связи C–O–C в карбоксилатных группах [24]. Полоса при 2165 см^{-1} соответствует обертону ароматического колебания C–H [25]. Пик при 818–819 см^{-1} соответствует внеплоскостным деформациям бензольного кольца [26] или внеплоскостным колебаниям C–H [19].

Флуоресцентная молекула IPCA (1,2,3,5-тетрагидро-5-оксо-имидазо[1,2-a]пиридин-7-карбоновая кислота) считается основным центром ФЛ в УТ, синтезированных из ЛК и ЭДА [27–29]. Эти флуорофоры IPCA образуются на поверхности УТ в результате межмолекулярной дегидратации и циклизации между ЛК и аминами. В молекулярной структуре УТ флуорофоры IPCA были подтверждены на основе масс-спектрометрии, ЯМР и элементного анализа [27, 28]. Группа под руководством Сонга представила FT-IR спектр выделенного флуорофора IPCA, показывающий характерные колебания групп –OH, C=O, C–N (C=N), –NH и –CH [27]. Эти функциональные группы соответствуют наблюдаемым в нашем FT-IR спектре (рис. 1): –OH (3285 см^{-1}), C=O (1653–1666 см^{-1}), C–N (C=N) (1434 см^{-1}), –NH (1485 и 3285 см^{-1}) и –CH (3285 см^{-1}). Эти результа-

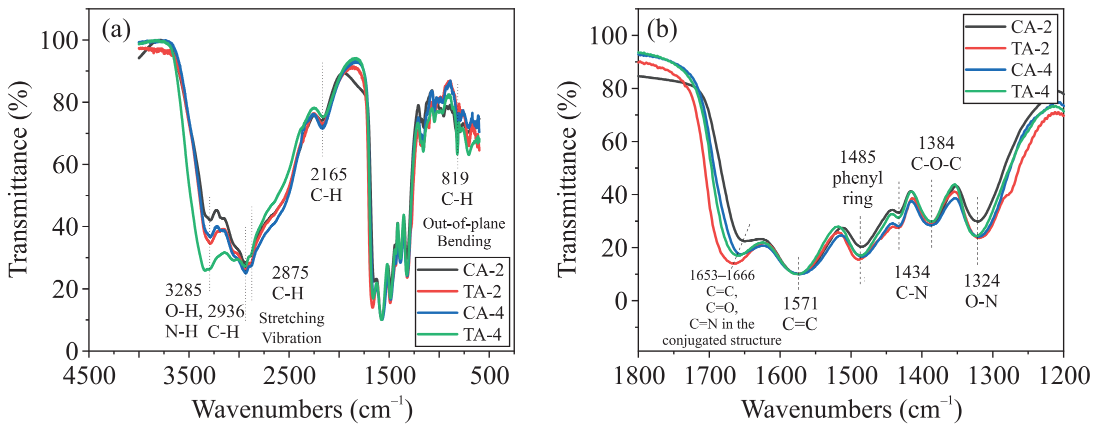

Рис. 1. (Цветной онлайн) FT-IR спектры некоторых образцов УТ в диапазонах: (a) – 500–4500 см$^{-1}$, (b) – 1150–1800 см$^{-1}$

ты позволяют предположить, что УТ, содержащие молекулярные флуорофоры типа IPCA, могут быть также синтезированы из ТА.

Спектры поглощения в УФ-видимой области водных растворов CA-2, CA-4, TA-2 и TA-4 показывают основные полосы с максимумами соответственно при 348, 351, 348 и 349 нм, с краем поглощения, простирающимся до 428 нм (рис. 2). Природа этих пиков связана с захватом носителей заряда поверхностными состояниями, обусловленными присутствием атомов азота [16]. Кроме того, спектр поглощения IPCA, представленный группой Сонга, показывает пик с максимумом при 350 нм, что дополнительно подтверждает наличие IPCA в наших УТ [27]. Пики при 237 и 287–289 нм соответствуют $\pi \to \pi$ переходам в сопряженных sp^2-доменах (C=C) [30, 31]. Пик при 287–289 нм также может быть обусловлен $n \to \pi$ переходом карбонильных групп C=O [32].

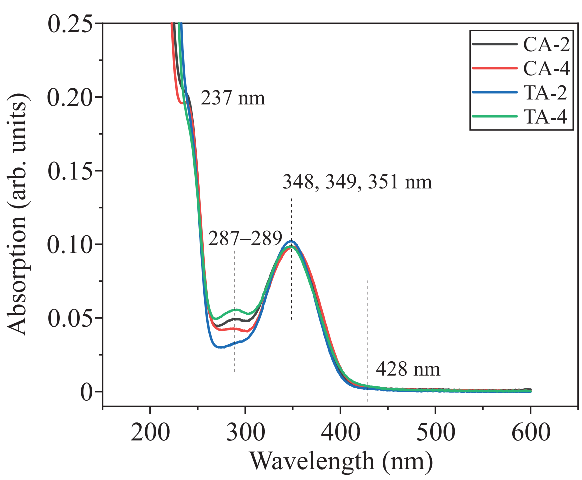

Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектры поглощения в УФ-видимой области образцов CA-2, CA-4, TA-2 и TA-4

На рисунке 3 показаны спектры ФЛ приготовленных УТ при длинах волн возбуждения от 300 до 420 нм с интервалами 20 нм. Максимальные пики интенсивности наблюдались при 443 нм при возбуждении 340–360 нм для всех образцов. КВ ФЛ оценивались как 77.5, 71.5, 71.6 и 56.9 % соответственно для CA-2, CA-4, TA-2 и TA-4. Наименьшее значение КВ ФЛ, зафиксированное для образца TA-4-УТ (56.9 %), предположительно связано с агрегацией УТ, обусловленной длительным временем синтеза в течение 4 ч. В результатах FT-IR, спектрах поглощения в УФ-видимом диапазоне и спектрах люминесценции не наблюдается существенных различий между образцами с разным временем синтеза, что может быть связано с удалением агрегированных УТ в процессе фильтрации до 10 нм. Времена жизни флуоресценции для всех образцов составляли 9–10 нс при возбуждении 300 нм.

Механизм люминесценции был предложен на основе ранее изученных УТ, синтезированных из ЛК и ЭДА [27–29, 33]. Согласно этой модели, молекулярные флуорофоры IPCA ковалентно связаны с УТ и действуют как люминесцентные центры, генерирующие собственную ФЛ. Кроме этого, вклад в ФЛ могут вносить разрывы цепей или неполная циклизация при формировании полиамидов, приводящие к появлению “оборванных” функциональных групп (например, –COOH, –NH_2), а также нерегулярности упаковки полимерных цепей, создающие локальные энергетические ловушки [10, 27]. Помимо IPCA, в структуре могут присутствовать полициклические ароматические фрагменты (например, пиридиновые или пиразиновые кольца), возникающие при частичной графитизации или неполной дегидратации/циклизации [12]. Зависимая от возбуждения ФЛ в основном обусловлена

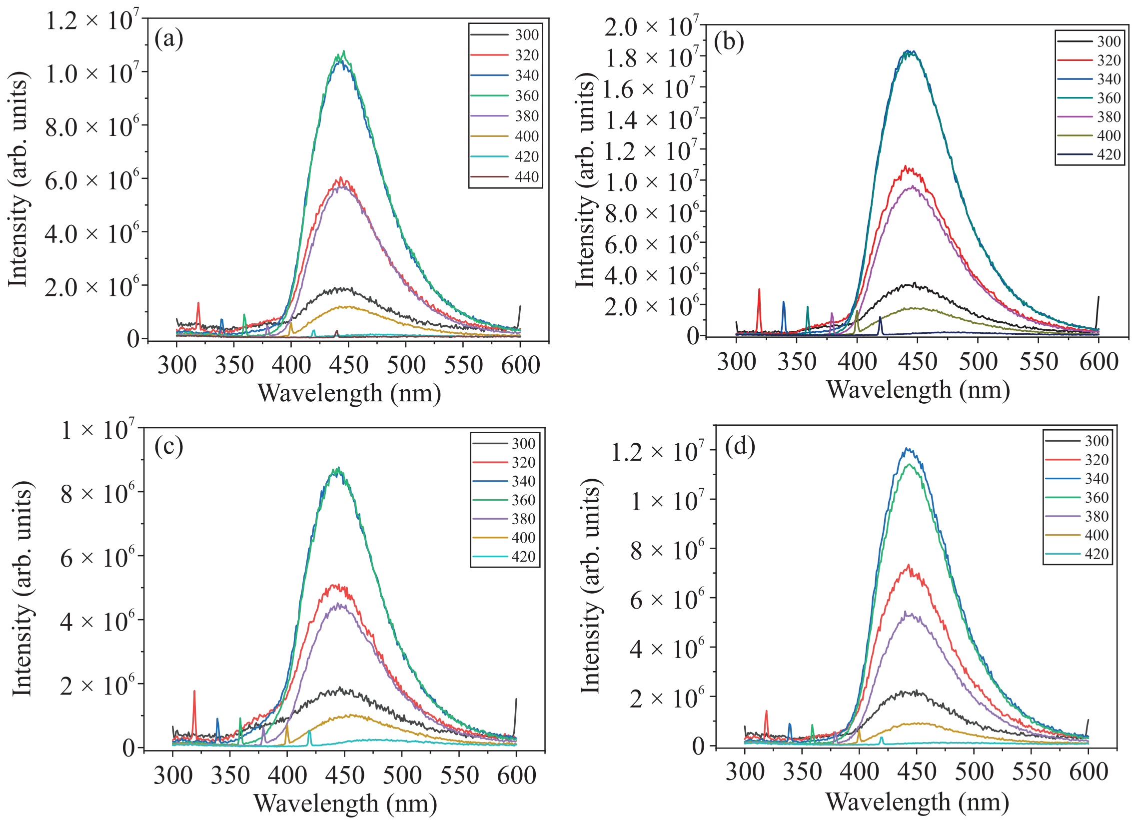

Рис. 3. (Цветной онлайн) Спектры ФЛ образцов: (a) – CA-2; (b) – CA-4; (c) – TA-2 и (d) – TA-4 при возбуждении 300–420 нм с шагом 20 нм

различными излучающими центрами. В нашем случае либо центры ФЛ однородны, либо ФЛ IPCA перекрывает другие источники ФЛ. КВ ФЛ УТ в значительной степени зависит от количества и эффективности ФЛ молекулярных флуорофоров IPCA, а также от гетерогенности структуры, включающей: дополнительные хромофоры (полициклические ароматические фрагменты, C=O группы), гетероатомные центры (азотные/кислородные функциональные группы), локальные нарушения в полимерной матрице (например, неупорядоченные участки). Поэтому наблюдаемые различия в КВ ФЛ между четырьмя образцами, вероятно, являются результатом комбинированного эффекта этих факторов. В заключение, основные спектры излучения УТ определяются свойствами сопряженных молекулярных флуорофоров IPCA, в то время как КВ ФЛ зависит как от флуорофоров, так и от структурной и химической гетерогенности материала.

ОСИД-структуры были собраны с использованием раствора TA-2 в качестве излучательного слоя для генерации ЭЛ, поскольку синтезированные УТ демонстрировали высокий КВ ФЛ. Структура одного из изготовленных устройств на стекле показана на рис. 4a. В качестве анода использовали напыленный на стекло оксид индия-олова (ITO), а в качестве катода – напыленный алюминий (Al) толщиной >100 нм с подслоем фторида лития (LiF) толщиной 1 нм. PEDOT:PSS и производное N,N′-дифенил-N,N′-(3-метилфенил)-1,1′-бифенил-4,4′-диамина (поли-TPD) и TPBi толщиной 20 нм использовали в качестве материалов для транспорта дырок. Диаграмма энергетических уровней ОСИД-структуры показана на рис. 4b. Электроны с катода, с энергетическим уровнем, определяемым работой выхода алюминия, перемещаются на низшую свободную молекулярную орбиталь (НСМО), в то время как дырки с анода перемещаются на высшую занятую молекулярную орбиталь (ВЗМО) излучательного слоя из УТ. Энергетические уровни УТ определяли с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС). Уровень ВЗМО УТ, полученный из результатов УФЭС, составляет -6.40 эВ, а уровень НСМО, оцененный по спектру поглощения на рис. 2, составляет -3.4 эВ. Значения энергетических уровней для других материалов были взяты из литературы [34].

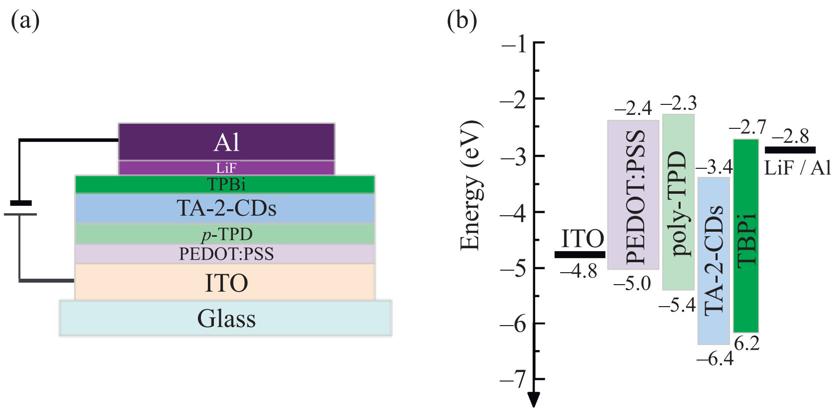

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Схема структуры ОСИД с УТ ТА-2 в качестве излучательного слоя и (b) – диаграмма энергетических уровней

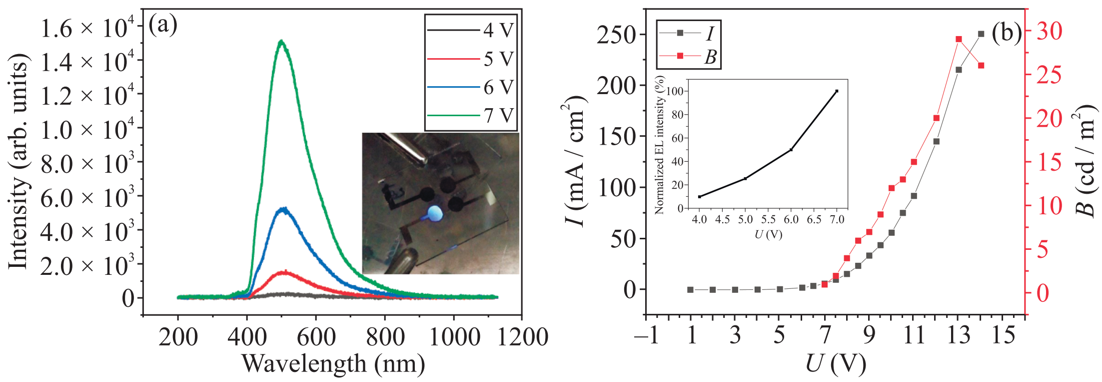

Рис. 5. (Цветной онлайн) (a) – Спектр ЭЛ ОСИД-структуры ITO/PEDOT-PSS(50 нм)/поли-TPD(20 нм)/УТ ТА-2/TPBi(15 нм)/LiF(1 нм)/Al(50 нм). Вставка: фотография ОСИД, излучающего голубой цвет. (b) – Вольт-амперная характеристика и зависимость яркости от напряжения структуры ОСИД. Вставка: график зависимости максимальной интенсивности ЭЛ от напряжения

На рисунке 5a показаны спектры ЭЛ ОСИД-структуры, содержащей ТА-2, при приложенных напряжениях 4 В (черная линия), 5 В (красная линия), 6 В (синяя линия) и 7 В (зеленая линия). Вольтамперная характеристика (I–V) демонстрирует зависимость тока от приложенного напряжения для ОСИД с использованием УТ в качестве излучательного слоя (рис. 5b). ОСИД излучает голубой свет с яркостью до 30 кд/м^2 (вставка на рис. 5a) и максимальным пиком ЭЛ при 498 нм. Во вставке на рис. 5b приведен график зависимости максимальной интенсивности ЭЛ от напряжения. Спектр ЭЛ, ВАХ и зависимость от яркости структуры ОСИД с использованием УТ СА-2 показаны на рис. S1 (см. дополнительные материалы). Красное смещение спектра ЭЛ (498 нм) на 50 нм по сравнению с ФЛ (443 нм) объясняется следующими причинами: смещением зоны рекомбинации к границе раздела Poly-TPD/УТ из-за барьеров инжекции зарядов и/или возможным образованием эксиплексов на границах органических слоев. Аналогичные сдвиги наблюдались в других растворимых ОСИД с несбалансированным транспортом зарядов [34].

Внешнее электрическое поле изменяет высоту энергетического барьера между p- и n-областями, нарушая равновесие потока носителей заряда через барьер внутри слоев ОСИД и активируя слой УТ. При приложении положительного потенциала к p-области потенциальный барьер уменьшается (прямое смещение), и область обеднения сужается. По мере увеличения напряжения до 7 В количество основных носителей, способных преодолеть барьер, увеличивается экспоненциально. После прохождения p–n-перехода они становятся неосновными носителями. Это приводит к увеличению концентрации неосновных носителей по обе стороны перехода (инжекция неосновных носителей). Одновременно равное количество основных носителей инжектируется в p- и n-области через контакты, компенсируя заряд инжектированных носителей. Это приводит к увеличению скорости рекомбинации и появлению ненулевого тока через переход, который растет экспоненциально с увеличением напряжения. При более высоких напряжениях ток продолжает увеличиваться, хотя зависимость тока от напряжения становится более линейной. Ток перестает расти после ~ 14 В, что указывает на насыщение светоизлучения УТ и ограничение тока устройством. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к дополнительным потерям энергии из-за нагрева и деградации материалов. В спектре ЭЛ при увеличении напряжения до 20 В основной пик при 498 нм сохраняет положение, и увеличивается интенсивность полосы электролюминесценции.

ОСИД, изготовленный с использованием TA-2-CD в качестве излучающего слоя, продемонстрировал яркость 30 кд/м^2, что сопоставимо с некоторыми ранними ОСИД на основе углеродных точек (УТ), описанными в литературе. Например, УТ, полученные из ЛК и диаминонафталина, обеспечивали яркость от ~ 12 до 136 кд/м^2 в аналогичной архитектуре устройства [35]. Позднее эта же группа исследователей синтезировала УТ сольвотермальным методом, используя в качестве прекурсора органическое соединение из класса триангуленов – полициклических ароматических углеводородов с уникальной треугольной структурой. ОСИД на основе этих УТ достигали яркости до 4762 кд/м^2 [36]. Устройства, изготовленные с применением УТ, синтезированных из лимонной и барбитуровой кислот, демонстрировали яркость до ~ 223 кд/м^2 [37], а ОСИД на основе УТ, полученных из синтетического красителя нейтральный красный, – до ~ 220 кд/м^2 [38]. Однако даже эти значения уступают современным светодиодам на основе традиционных квантовых точек (например, перовскитных или CdSe) или органических излучателей, яркость которых может превышать 5000 кд/м^2 [39].

Разница в характеристиках объясняется, в частности, неэффективным переносом заряда в слоях на основе УТ и ограниченной плотностью излучающих флуорофоров типа IPCA. Примечательно, что КВ ФЛ наших УТ (до 77.5 %) превосходит значения, характерные для большинства известных люминофоров на основе УТ (обычно 30–70 %) [40]. Это указывает на потенциал дальнейшей оптимизации архитектуры устройств – например, за счет межфазной инженерии или создания гибридных эмиссионных слоев для устранения разрыва в производительности. В будущих исследованиях особую актуальность представляет сочетание УТ с органическими матрицами с высокой подвижностью носителей заряда или применение усовершенствованных конфигураций устройств для повышения эффективности электролюминесценции.

4. Заключение. В работе были синтезированы гидротермальным методом люминесцирующие УТ в синем диапазоне с использованием трикарбоновых кислот в качестве источника углерода и ЭДА в качестве источника азота. Полученные УТ демонстрировали независимую от длины волны возбуждения синюю ФЛ с квантовым выходом до 77.5 %. Механизм люминесценции УТ в основном определяется свойствами сопряженных молекулярных флуорофоров IPCA, в то время как величина КВ ФЛ зависит от количества и эффективности фотолюминесценции молекулярных флуорофоров IPCA, а также от гетерогенности структуры, включающей: дополнительные хромофоры (полициклические ароматические фрагменты, C=O группы), гетероатомные центры, локальные нарушения в полимерной матрице. Структура ОСИД с УТ TA-2 в качестве излучательного слоя продемонстрировала ЭЛ с максимумом при 498 нм и яркостью 30 кд/м^2.

Финансирование работы. Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российскому научному фонду (Проект # 24-42-04003) и Министерству образования и науки России (FSRG-2023-0026).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. M. Semeniuk, Z. Yi, V. Poursorkhabi, J. Tjong, S. Jaffer, Z. H. Lu, and M. Sain, ACS Nano **13**, 6224 (2019).
2. S. Liao, X. Zhao, F. Zhu, M. Chen, Z. Wu, X. Song, H. Yang, and X. Chen, Talanta **180**, 300 (2018).
3. Z. Fu and F. Cui, RSC Adv. **6**, 63681 (2016).
4. K. Jiang, Y. Wang, C. Cai, and H. Lin, Adv. Mater. **30**, 1800783 (2018).
5. M. L. Liu, B. Chen, C. M. Li, and C. Z. Huang, Green Chem. **21**, 449 (2019).
6. A. B. Bourlinos, A. Stassinopoulos, D. Anglos, R. Zboril, V. Georgakilas, and E. P. Giannelis, Chem. Mater. **20**, 4539 (2008).
7. H. Liu, Y. Zhang, and C. Huang, J. Pharm. Anal. **9**, 202 (2019).
8. L. Li and T. Dong, J. Mater. Chem. C **6**, 7944 (2018).
9. X. Zhai, P. Zhang, C. Liu, T. Bai, W. Li, L. Dai, and W. Liu, Chem. Commun. **48**, 7955 (2012).
10. D. Qu, M. Zheng, L. Zhang, H. Zhao, Z. Xie, X. Jing, R. E. Haddad, H. Fan, and Z. Sun, Sci. Rep. **4**, 5294 (2014).
11. F. Gao, S. Ma, J. Li, K. Dai, X. Xiao, D. Zhao, and W. Gong, Carbon **112**, 131 (2017).

12. T. H. T. Dang, V. T. Mai, Q. T. Le, N. H. Duong, and X. D. Mai, Chem. Phys. **527**, 110503 (2019).
13. M. Sudolska and M. Otyepka, Appl. Mater. Today **7**, 190 (2017).
14. X. Zhou, G. Zhao, X. Tan, X. Qian, T. Zhang, J. Gui, L. Yang, and X. Xie, Microchim. Acta **186**, 317 (2019).
15. X. Meng, Y. Wang, X. Liu, M. Wang, Y. Zhan, Y. Liu, W. Zhu, W. Zhang, L. Shi, and X. Fang, Opt. Mater. **77**, 48 (2018).
16. X. Han, S. Zhong, W. Pan, and W. Shen, Nanotechnology **26**, 065402 (2015).
17. A. Tomskaya, I. P. Asanov, I. Yushina, M. I. Rakhmanova, and S. Smagulova, ACS Omega **7**, 44093 (2022).
18. V. Roshni and O. D. Praveen, Brazilian Journal of Analytical Chemistry **4**, 17 (2017).
19. X. Wang, J. Zhang, W. Zou, R. Wu, and W. Shi, J. Mater. Chem. C **3**, 10715 (2015).
20. L. Yang, W. Jiang, L. Qiu, X. Jiang, D. Zuo, D. Wang, and L. Yang, Nanoscale **7**, 6104 (2015).
21. Y. Sheng, J. Wei, J. Pan, P. Huang, S. Guo, J. Zhang, X. Zhang, and B. Feng, Chem. Phys. Lett. **638**, 196 (2015).
22. X. Zhao, J. Zhang, and L. Shi, RSC Adv. **7**, 42159 (2017).
23. Y. Jiang, B. Wang, F. Meng, Y. Cheng, and C. Zhu, J. Colloid Interface Sci. **452**, 199 (2015).
24. Z. Ma, H. Ming, H. Huang, Y. Liu, and Z. Kang, New J. Chem. **1**, 861 (2012).
25. S.-K. Wang, C. Sook, and P. Sung, doi:10.1021/ma011316 (2002).
26. Y. Wang, L. Yang, B. Liu, S. Yu, and C. Jiang, New J. Chem. **42**, 15671 (2018).
27. Y. Song, S. Zhu, S. Zhang, Y. Fu, L. Wang, X. Zhao, and B. Yang, J. Mater. Chem. C **3**, 5976 (2015).
28. P. Duan, B. Zhi, L. Coburn, C. L. Haynes, and K. Schmidt-Rohr, Magn. Reson. Chem. **58**, 1130 (2019).
29. Q. Fang, Y. Dong, Y. Chen, C. H. Lu, Y. Chi, H. H. Yang, and T. Yu, Carbon **118**, 319 (2017).
30. M. Hu, J. Qi, J. Ruan, G. Shen, and J. Biomed, Nanotechnol. **14**, 1117 (2018).
31. V. M. Naik, D. B. Gunjal, A. H. Gore, S. P. Pawar, S. T. Mahanwar, P. V. Anbhule, and G. B. Kolekar, Diam. Relat. Mater. **88**, 262 (2018).
32. Y. Wei, L. Chen, J. Wang, X. Liu, Y. Yang, and S. Yu, Opt. Mater. (Amst.) **100**, 109647 (2020).
33. C. J. Reckmeier, J. Schneider, Y. Xiong, J. Hausler, P. Kasak, W. Schnick, and A. L. Rogach, Chem. Mater. **29**, 10352 (2017).
34. F. Yuan, Y. K. Wang, G. Sharma et al . (Collaboration), Nat. Photonics **14**, 171 (2020).
35. F. Yuan, Z. Wang, X. Li, Y. Li, Z. A. Tan, L. Fan, and S. Yang, Adv. Mater. **29**(3), 1604436 (2017).
36. F. Yuan, T. Yuan, L. Sui, Z. Wang, Z. Xi, Y. Li, X. Li, L. Fan, Z. Tan, A. Chen, M. Jin, and S. Yang, Nat. Commun. **9**(1), 2249 (2018).
37. T. Zhang, X. Wang, Z. Wu, T. Yang, H. Zhao, J. Wang, H. Huang, Y. Liu, and Z. Kang, Nanoscale Adv. **3**(24), 6949 (2021).
38. Y. Ding, X. Li, Z. Zheng, M. Chen, Y. Zhang, Z. Liu, F. Wang, and L. Guan, J. Lumin. **249**, 119036 (2022).
39. E. Jang and H. Jang, Chem. Rev. **123**(8), 4663 (2023).
40. B. Wang and S. Lu, Matter **5**(1), 110 (2022).