

Фотофизические свойства индоло[3,2-*b*]карбазолов — перспективного класса материалов для оптоэлектроники

© В.М. Светличный[¶], Е.Л. Александрова*, Л.А. Мягкова,
Н.В. Матюшина, Т.Н. Некрасова, А.Р. Тамеев[†],
С.Н. Степаненко[†], А.В. Ванников, В.В. Кудрявцев

Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук,
199004 Санкт-Петербург, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

(Получена 26 апреля 2010 г. Принята к печати 26 апреля 2010 г.)

Проведен сравнительный анализ фотофизических свойств новых синтезированных индокарбазолов — индоло[3,2-*b*]карбазола и его производных. Показано, что они по своим светочувствительным (интегральная светочувствительность — до $(5-8) \cdot 10^{-2}$ (лк · с)⁻¹, спектральная — на уровне 10^5 см²/Дж⁻¹; квантовый выход фотогенерации свободных носителей заряда — 0.1) и транспортным (эффективная подвижность в 5,11-диоктилиндоло[3,2-*b*]карбазола — более 10^{-5} см²/(В · с)) параметрам значительно превосходят производные индола и карбазола и приближаются к пентацену, имеющему среди молекулярных сред (органических кристаллов) наибольшие квантовые выходы фотогенерации носителей заряда. Высокий уровень фотолюминесценции синтезированных производных индоло[3,2-*b*]карбазола позволяет надеяться на возможность их использования в электролюминесцентных приборах.

1. Введение

Индоло[3,2-*b*]карбазолы (ИК) представляют собой класс соединений со структурой, подобной пентацену, имеющему благодаря низким значениям потенциала ионизации молекулы $I_D \approx 6.8$ эВ [1,2] высокие светочувствительные (квантовый выход фотогенерации носителей заряда $\eta \approx 0.25$ [2]) и хорошие транспортные (подвижность ~ 1 см²/(В · с) [1,3]) свойства. Однако пентацен чувствителен не только к свету, но и к атмосферному кислороду и практически нерастворим в большинстве доступных органических растворителей, что затрудняет получение на его основе полимеров. Производные индокарбазолов позволяют решать эти проблемы. Действительно, два атома азота в молекуле ИК создают полностью ароматическую молекулу, которая понижает энергетический уровень верхней занятой молекулярной орбитали. В результате это должно повышать фотостабильность материала. Возможность введения длинноцепных заместителей по атомам азота позволяет решать проблему растворимости этих соединений в обычных органических растворителях, а введение реакционноспособных заместителей обеспечивает переход к соответствующим полимерам, имеющим структуру лестничного типа с развитой системой π -сопряжения, необходимой для обеспечения транспорта носителей заряда. Кроме того, наличие двух атомов

азота в структуре молекулы ИК при разветвленной ароматической системе приводит к низким значениям I_D , а также способствует формированию донорно-акцепторных комплексов [3,4], обеспечивающих поглощение в видимой области спектра материала, получаемого на их основе. Поэтому эти соединения должны обладать эффективным переносом заряда как внутри молекулы, так и по всему объему материала, обуславливая высокие светочувствительные и транспортные свойства, приближающиеся к таковым у органических полупроводников, находящихся среди наилучших образцов для активных слоев органических *p*-типа полевых транзисторов OTFTs [5].

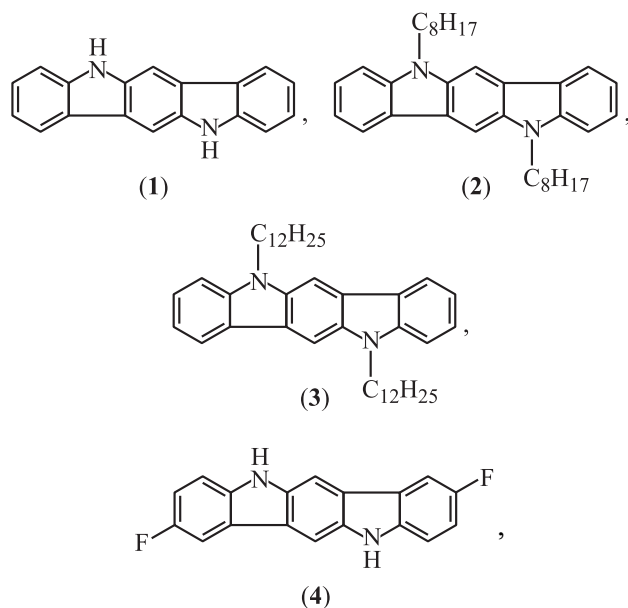
Таким образом, цель работы состоит в исследовании в сравнении с индолом, карбазолом, применяющихся с 1960-х годов в качестве основы светочувствительных материалов, и пентаценом фотофизических свойств синтезированного индоло[3,2-*b*]карбазола и его производных для оценки использования индокарбазольных структур в органической электронике в качестве молекул с дырочной проводимостью в полевых транзисторах.

2. Экспериментальная часть

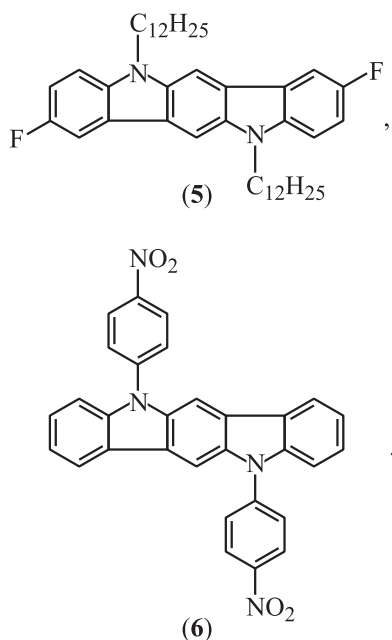
Индоло[3,2-*b*]карбазол (1) и ряд его производных: (2) — 5,11-диоктилиндоло[3,2-*b*]карбазола; (3) — 5,11-дидодецилиндоло[3,2-*b*]карбазола; (4) — 2,8-дифто-

[¶] E-mail: valsvet@hq.macro.ru

риндоло[3,2-*b*]карбазол:



а также новых соединений: (5) — 2,8-дифтор-5,11-дидодецилиндоло[3,2-*b*]карбазола и (6) — 5,11-динитрофенилиндоло[3,2-*b*]карбазол синтезированы с использованием методик [6–11]:



Строение синтезированных индоло[3,2-*b*]карбазолов подтверждено методами инфракрасной и ^1H -ЯМР-спектроскопии.

Измерения фотофизических свойств: спектров поглощения, люминесценции, светочувствительности и квантового выхода фотогенерации носителей заряда проводили для мономеров, диспергированных в полиметилметакрилате в толуольном растворе, и для пленок, полученных из этих растворов дисперсий методом центрифугирования. Концентрация индолокарбазолов —

25%. Для сравнения изучаемых характеристик в тех же условиях приготавливали растворы и пленки карбазола и индола.

Спектры ^1H -ЯМР синтезированных соединений измеряли при $T = 298\text{ K}$ на приборе фирмы Bruker AC-200, 200 МГц. Вещества растворяли в диметилсульфоксиде (ДМСО)- d_6 или в CDCl_3 для получения растворов концентрацией 1%.

Инфракрасные спектры порошкообразных синтезированных в работе соединений измеряли на фурье-спектрометре фирмы „Bruker“ Vertex-70 на микроприставке неполного внутреннего отражения „Pike“. Спектры регистрировались в диапазоне $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ с разрешением 4 cm^{-1} , число сканов — 32.

Электронные спектры поглощения измерены в растворах концентрации ($10^{-4}\text{--}2 \cdot 10^{-5}$) в кюветах толщиной 1 см на спектрофотометре СФ-2000 („ЛОМО“).

Измерение светочувствительности $S_{0.1}$ и квантового выхода фотогенерации свободных носителей заряда η выполнено в электрофотографическом (ЭФ) режиме по методике [12,13] в области спектра $400\text{--}700\text{ nm}$ при напряженности электрического поля $(1\text{--}10) \cdot 10^5\text{ V/cm}$, плотность потока фотонов составляла $10^{13}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Светочувствительность $S_{0.1}$ определяли по критерию спада поверхностного потенциала слоя на 10% от начального значения, т.е. при $\Delta V/V = 0.1$. Интегральная светочувствительность $S_{0.1}^i$ измерена при освещении образца галогеновой лампой КГМ-300 (мощность 300 Вт).

Для ЭФ измерений $S_{0.1}$ и η фторированные, алкилированные и арилированные производные индоло[3,2-*b*]карбазолы наносили из растворов в хлороформе их дисперсий в полиметилметакрилате (ПММА) методом центрифугирования на проводящую подложку (сплав $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$, смешанный оксид индия и олова — ИТО). Толщина слоев составляла 1–3 мкм.

Спектры люминесценции измеряли на люминесцентном спектрофотометре LS 100 (фирма РТУ, Канада) в интервале длин волн $350\text{--}700\text{ nm}$. Длина волны возбуждающего света — 337 нм. Ширина щелей на входе и выходе — 4 нм. Измерения проводили для растворов образцов в хлороформе (концентрация 0.025 моль/л) в кварцевой кювете толщиной 1 см.

Для измерения электропроводности тонких слоев индолокарбазолов были приготовлены диодные структуры (сэндвич). Слой ИК наносили методом термического испарения вещества на подложку (полированная стеклянная пластина с электропроводящим слоем $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$) в вакууме при остаточном давлении 0.01 Па. Подложку не термостатировали, поэтому в процессе напыления ее температура поднималась, но не выше 70°C . Далее этим же методом на поверхность слоя ИК наносили второй электрод — слой алюминия. Толщина слоев ИК была в пределах от 200 до 850 нм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) стационарных токов на образцах ИТО/ИК/Al были измерены с помощью источника-измерителя Keithley 236 при комнатной температуре.

3. Обсуждение результатов

Параметры фотофизических процессов: поглощения, светочувствительности и люминесценции для синтезированных соединений приведены в табл. 1, а спектры соответственно поглощения, светочувствительности и люминесценции — на рис. 1–5. Полученные значения для ИК сравнены с таковыми для карбазола (К) — аналога антрацена ($I_D = 7.42$ эВ [1,2]), имеющего $\eta \approx 10^{-4}$ [1,12], т.е. на 2 порядка ниже чем К, и индола (И) — аналога нафталина ($I_D = 8.2$ эВ [2]).

Из спектров поглощения для карбазола (К), индола (И) и индоло[3,2-*b*]карбазола (ИК) (рис. 1, кривые 1–3) видно, что длина волны (энергия) края собственного поглощения для К равна 360 нм (3.44 эВ), для И — 327 нм (379 эВ). Энергии различаются

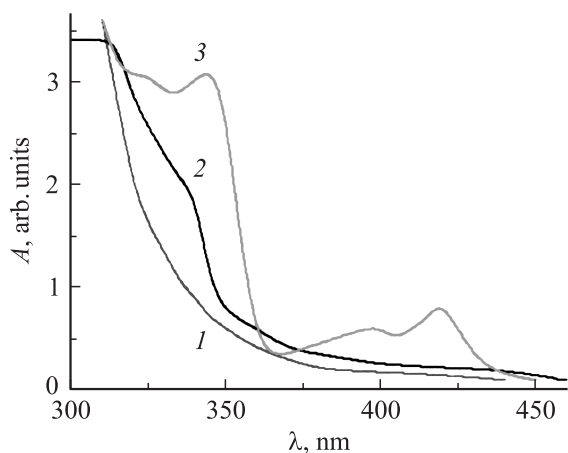


Рис. 1. Спектры поглощения в ультрафиолетовой области излучения индолокарбазолов и родственных соединений: 1 — индол (И), 2 — карбазол (К), 3 — индоло[3,2-*b*]карбазол (ИК) в хлороформе.

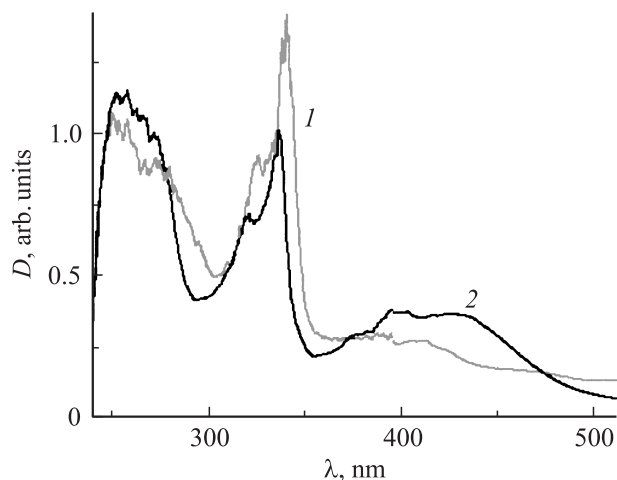


Рис. 2. Спектры поглощения в ультрафиолетовой области излучения производных индолокарбазолов в хлороформе: 1 — 2,8-дифториндоло[3,2-*b*]карбазол, 2 — 5,11-ди-пара-нитрофенилиндоло[3,2-*b*]карбазола.

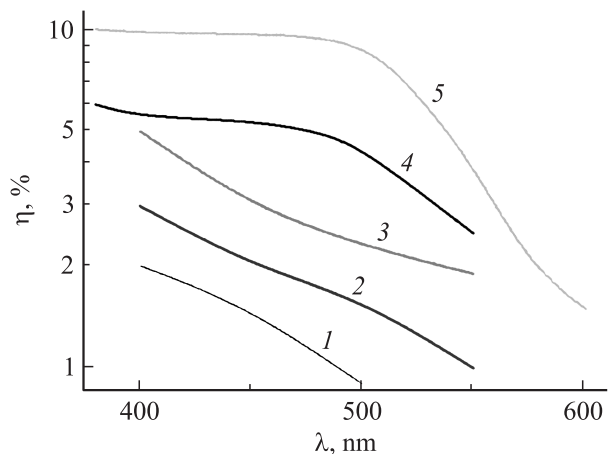


Рис. 3. Спектры квантового выхода фотогенерации носителей заряда в ряду производных ИК и родственных ему соединений: И — 1, К — 2, ИК — 3; 2,8-дифториндоло[3,2-*b*]карбазол — 4; 5,11-ди-пара-нитрофенилиндоло[3,2-*b*]карбазол — 5.

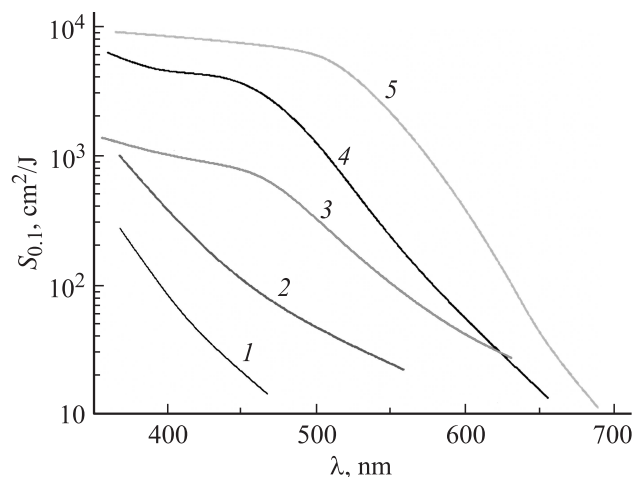


Рис. 4. Спектры светочувствительности: карбазол (К) — 1; индол (И) — 2; индоло[3,2-*b*]карбазол — 3; 2,8-дифториндоло[3,2-*b*]карбазол — 4; 5,11-ди-пара-нитрофенилиндоло[3,2-*b*]карбазол — 5.

на 0.35 эВ, что коррелирует с разностью потенциалов ионизации I_D для К ($I_D = 7.4–7.6$ эВ) и для И ($I_D = 7.9$ эВ). Энергия края полосы поглощения для ИК равна 440 нм (2.82 эВ) и отличается от таковой для К на 0.72 эВ. Отсюда можно определить величину потенциала ионизации I_D молекулы ИК. Она лежит в интервале 6.7–6.9 эВ, что на 0.1–0.3 эВ выше I_D пентацена. По сравнению с К и И для ИК в спектрах поглощения появляются новые полосы в области спектра $\lambda > 320$ нм, причем энергии максимумов полос поглощения ИК, соответствующих длинам волн 340, 348, 380, 400 и 422 нм, различаются на 0.09, 0.3, 0.15 и 0.16 эВ. Полученные значения разностей энергий ΔE для ИК коррелируют с разностями энергий ΔE для К, полосы которого 287, 313 и 340 нм различаются на 0.36

Таблица 1. Фотофизические характеристики исследованных производных индолакарбазолов и родственных соединений: длина волны λ_{cr} (энергия, эВ), соответствующая краю собственного поглощения; длины волн (энергии) максимумов полос поглощения, λ_{max} ; квантовый выход фотогенерации свободных носителей заряда η ; интегральная светочувствительность S_i ; длины волн (энергии), соответствующие максимумам полос люминесценции λ_{lum} ; разности энергий максимумов поглощения ΔE_i^{α} ; разности энергий максимумов люминесценции, ΔE_i^{λ} .

Об- ра- зец	Соединение	λ_{cr} , нм	λ_{max} , нм (эВ)	η , %	S_i , (лк·с) ⁻¹	λ_{lum} , нм	ΔE_i^{α} , эВ	ΔE_i^{λ} , эВ
1	Индол (И)	327 (3.79)		~ 1	$\leq 10^{-3}$		—	—
2	Карбазол (К)	360 (3.44)	287 (4.32); 313 (3.96); 340 (3.65)	3.0 ± 1.0	$2.2 \cdot 10^{-3}$	345 (3.59); 358 (3.46); 382 (3.25); 402 (3.08)	0.36; 0.31	0.13; 0.21; 0.17
3	ИК	440 (2.82)	340 (3.65); 348 (3.56); 380 (3.26); 400 (3.10); 422 (2.95)	6.2 ± 2.0	$7.8 \cdot 10^{-3}$	420, 442, 468, 497	0.09; 0.3; 0.16; 0.15	—
4	Додецил-ИК	440 (2.82)	340 (3.65); 348 (3.56); 380 (3.26); 400 (3.10); 422 (2.95)	6.5 ± 2.1	$8.9 \cdot 10^{-3}$	430 (2.88); 455 (2.72); 468 (2.65)	0.09; 0.3; 0.16; 0.15	0.16; 0.07
5	Октил-ИК	440 (2.82)	340 (3.65); 348 (3.56); 380 (3.26); 400 (3.10); 422 (2.95)	6.4 ± 2.1	$8.1 \cdot 10^{-3}$	430 (2.88); 455 (2.72); 468 (2.65)	0.09; 0.3; 0.16; 0.15	0.16; 0.07
6	F-ИК	455 (2.72)	389 (3.19); 410 (3.02); 426 (2.91)	8.4 ± 3.0	$5.6 \cdot 10^{-2}$	431 (2.88); 456 (2.72); 482 (2.57)	0.17; 0.09	0.16; 0.15
7	F-додецил-ИК	455 (2.72)	392 (3.16); 412 (3.00); 432 (2.87)	8.9 ± 3.0	$6.1 \cdot 10^{-2}$	448 (2.77); 472 (2.63); 507 (2.45)	0.16; 0.13	—
8	NO ₂ -ИК	510 (2.43)	375–382 (3.3–3.25)(3.27); 395–403 (3.14–3.03)(3.11); 425–431 (2.92–2.95)(2.93)	10.2 ± 3.2	$7.5 \cdot 10^{-2}$	—	0.16; 0.175	0.14; 0.18

и 0.31 эВ. Следует отметить, что разность энергий максимумов этих полос лежит в интервале 0.13–0.17 эВ, как и для ИК, что свидетельствует о том, что оптические переходы при поглощении квантов света обусловлены теми же электронными уровнями молекулы и что ИК представляет собой внутримолекулярные комплексы с переносом заряда (ВКПЗ) — более сильные по срав-

нению с К, в котором существует перенос заряда между атомом азота и ароматическим кольцом [14].

Спектры поглощения замещенных ИК (рис. 2), содержащих в качестве заместителей атомы фтора в положениях 2,8 и нитрофенильные группы в положениях 5,11, также характеризуются наличием трех полос поглощения, смещенных относительно исходного ИК в инфракрасную область спектра.

Величина квантового выхода η в ряду И–К–ИК возрастает (рис. 3) по мере уменьшения потенциала ионизации I_D . В ряду индолакарбазолов, имеющих заместители F и NO₂-Ph, величина η возрастает при переходе от индола[3,2-б] карбазола к 2,8-дифториндолакарбазолу и 5,11-динитрофенилиндолакарбазолу по мере усиления акцепторных свойств заместителя. Установленные закономерности свидетельствуют о внутримолекулярном переносе заряда между атомом азота ароматического кольца (донором) и акцепторными заместителями F и NO₂, что подтверждает сделанное ранее заключение о молекуле ИК как ВКПЗ с большей по сравнению с К степенью переноса заряда δ , нижнюю оценку величины которой дают экспериментально определенные значения η : $\delta \geq \eta$. Величины квантовых выходов изученных ИК и его производных лежат в интервале 0.06–0.1 и увеличиваются в ряду ИК–(F-ИК)–(NO₂-ИК). Высокие значения η для NO₂-ИК связаны, очевидно, с хорошими транспортными свойствами этого материала, звено кото-

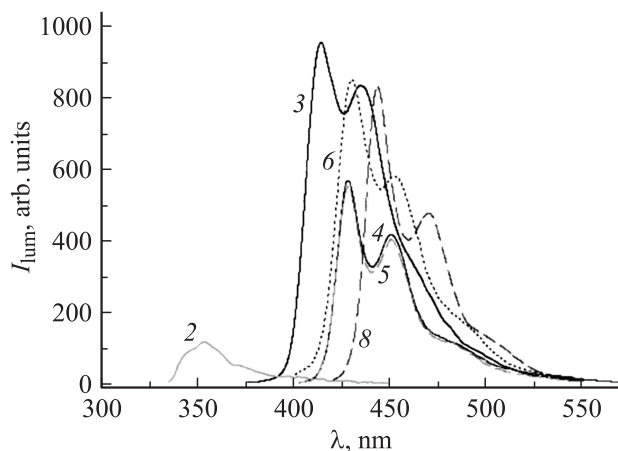


Рис. 5. Спектры люминесценции синтезированных производных индола[3,2-б]карбазола: 3, 6 — в этаноле; 4, 5, 8 — в хлороформе. $C = 10^{-4}$ моль/л. Нумерация спектров 3–6, 8 соответствует соединениям из табл. 1. Для сравнения приведен спектр К (спектр 2).

рого по структуре близко к двоекному трифениламинному (ТФА) фрагменту, имеющему высокие значения η и подвижности носителей заряда [4,15,16].

С величинами D и η и видом спектров поглощения $D(\lambda)$ и $\eta(\lambda)$ коррелируют значения спектральной светочувствительности ($S_{0,1}$) и вид спектров светочувствительности (рис. 4), измеренные в электрофотографическом режиме. Величина $S_{0,1}$, как видно из рис. 4 (кривые 1–4) и табл. 1, находится в диапазоне 10^4 – 10^5 см²/Дж и, так же как и η , возрастает в ряду:

$$S_{0,1}(\text{И}) > S_{0,1}(\text{К}) > S_{0,1}(\text{ИК}) > S_{0,1}(\text{F-ИК-F}) \\ > S_{0,1}(\text{NO}_2\text{-Ag-ИК-Ag-NO}_2).$$

Все синтезированные производные индоло[3,2-*b*]карбазола, кроме 5,11-динитро (табл. 1, образцы 4–6,8), в растворе люминесцируют в видимой области спектра (рис. 5, образцы 4–6,8). Спектры люминесценции исходного индоло[3,2-*b*]карбазола смещены в длинноволновую область на 70 нм по сравнению со спектрами индола и карбазола.

Спектр люминесценции ИК состоит из двух полос, соотношение интенсивностей которых изменяется при введении заместителей. Введение двух алкильных заместителей в положение 5,11- или атомов фтора в положение 2,8-индоло[3,2-*b*]карбазола приводит к дальнейшему сдвигу максимума полос люминесценции (~ 14 нм), который не зависит от природы заместителя. В случае алкильных заместителей ни положение максимумов полос люминесценции, ни их интенсивность не зависят от длины алкильного заместителя. Одновременное введение атомов фтора и алкильных заместителей в индоло[3,2-*b*]карбазол вызывает дальнейший сдвиг максимума полосы люминесценции на 15 нм в длинноволновую область (до 443 нм). Очевидно, что эти сдвиги максимумов полос люминесценции связаны с перераспределением электронной плотности на ароматических ядрах при введении заместителей, что, как и спектры $D(\lambda)$ и $\eta(\lambda)$, подтверждает заключение о внутримолекулярном переносе заряда в молекуле ИК.

При введении заместителей сменяется не только положение максимумов полосы люминесценции, но и соотношение интенсивностей полос. Так, при переходе от индоло[3,2-*b*]карбазола к 2,8-дифтор-5,11-дидодецилиндоло[3,2-*b*]карбазолу (табл. 1, образец 8) это соотношение уменьшается от 0.87 до 0.57. По аналогии с карбазолом можно предположить, что длинноволновая полоса спектра соответствует эксимерному свечению. По-видимому, с введением заместителей вероятность образования эксимеров уменьшается и увеличивается степень внутримолекулярного переноса электрона $\delta \approx \eta$. Это может явиться существенным фактором для дополнительного увеличения интенсивности люминесценции.

Действительно, из спектров люминесценции изученных мономеров видно, что область излучения как индолокарбазолов, так и его производных с акцепторными за-

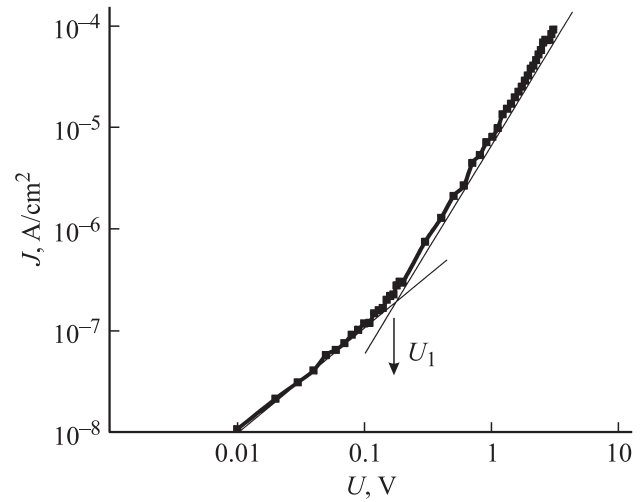


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика стационарного тока в образце ИТО/ИК(1)/Al. Положительный потенциал — на электроде ИТО. Напряжение U_1 -перехода от линейной к квадратичной области характеристики показано стрелкой.

местителями смещается в видимую часть по сравнению с карбазолом, излучающим в ультрафиолетовой области спектра, причем интенсивность люминесценции возрастает. Такое возрастание может быть вызвано увеличением не столько квантового выхода люминесценции (поскольку возрастает квантовый выход η конкурирующего процесса — фотогенерации свободных носителей заряда), сколько временем жизни возбужденных состояний ВКПЗ, образованных атомом азота индолокарбазольного кольца с ароматической системой самого кольца.

На рис. 6 представлена вольт-амперная характеристика стационарных токов в образце структуры ИТО/ИК/Al. В образцах с производными ИК были получены аналогичные ВАХ. На графике можно выделить омическую (линейную) зависимость тока от напряжения в области низких напряжений $J \propto U$ (I), которая переходит в область квадратичной зависимости тока $J \propto U^2$ (II). Переход между областями I и II происходит при некотором напряжении U_1 , когда концентрация тепловых равновесных свободных зарядов становится сравнимой с концентрацией инжектированных зарядов. Работа выхода электрона из ИТО равна 4.8 эВ [17]. Энергия верхней заполненной молекулярной орбитали ИК(2) и его производных в кристаллической фазе ниже — 5.12 эВ, поэтому потенциал ионизации не менее 5.1 эВ [10,11]. Из этих данных следует, что электрод ИТО обеспечивал инжекцию дырок в излучаемые слои ИК. В модели инжекционных токов ВАХ в области II описывают „ловушечным“ квадратичным законом [18]:

$$J = \frac{9}{8} \theta \varepsilon \varepsilon_0 \mu \frac{U^2}{L^3},$$

где J — плотность тока, ε — относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная,

Таблица 2. Электрофизические характеристики образцов на основе слоев ИК

Образец	L , см	σ , с/см	U_1 , В	$\mu\theta$, см ² /(В·с)
ИК(1)	$2.6 \cdot 10^{-5}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$	0.14	$5.9 \cdot 10^{-7}$
ИК(2)	$8.2 \cdot 10^{-5}$	$8.3 \cdot 10^{-11}$	0.13	$1.5 \cdot 10^{-5}$
ИК(4)	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-11}$	0.12	$2.6 \cdot 10^{-7}$
ИК(6)	$2.7 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$	0.10	$3.0 \cdot 10^{-7}$

θ — постоянная, определяющая степень заполнения ловушек, μ — эффективная подвижность носителей заряда. Из этого выражения на основании полученных данных определяли параметр $\mu\theta$. В расчетах принимали, что диэлектрическая проницаемость равна 3. Электропроводность слоев σ определяли из ВАХ в линейной области. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Значения параметра $\mu\theta$ можно рассматривать как нижнюю границу величины эффективной подвижности носителей заряда. Наши условия приготовления тонких слоев ИК были близки к условиям, принятым в работе [10], в которой показано, что при осаждении на подложку молекулы ИК(2) формируют стопки из π - π сопряженных плоскостей так, что стопки ориентированы вдоль поверхности подложки. Такая упаковка молекул способствует анизотропии проводимости с более высокой подвижностью носителей заряда в слое вдоль поверхности подложки. Подвижность дырок в слое ИК(2), измеренная в структуре полевого транзистора (т.е. вдоль поверхности подложки), достигала значения $3 \cdot 10^{-3}$ см²/(В·с) [10]. С учетом того что наши образцы имели структуру диода (т.е. проводимость измеряли в направлении, наименее благоприятном для эффективного транспорта носителей заряда в слое ИК(2)), полученное значение нижней границы подвижности $1.5 \cdot 10^{-5}$ см²/(В·с) хорошо согласуется с результатами цитируемой работы. Необходимо отметить, что в случае производных ИК(4) и ИК(6) электроакцепторные фрагменты их молекул лимитируют эффективный межмолекулярный перенос дырок (нижняя граница подвижности не выше, чем в ИК(1) с монолярной дырочной проводимостью), но в то же время они должны способствовать транспорту электронов, т.е. амбиполярной проводимости этих слоев.

4. Заключение

Проведенный сравнительный анализ фотофизических свойств новых синтезированных индолокарбазолов — индоло[3,2-b]карбазола и его производных показал, что они по своим светочувствительным (интегральной светочувствительности — до $(5-6) \cdot 10^{-2}$ (лк·с)⁻¹, спектральной — на уровне 10^5 см²Дж⁻¹; квантовый выход фотогенерации свободных носителей заряда — 0.1) и зарядо-транспортным параметрам значительно превосходят производные индола и карбазола и прибли-

жаются к пентацену, имеющему среди молекулярных сред (органических кристаллов) наибольшие квантовые выходы фотогенерации носителей заряда. Высокий уровень фотолюминесценции синтезированных производных индоло[3,2-b]карбазола позволяет надеяться на возможность их использования в электролюминесцентных приборах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-03-00439-а, и программы президиума РАН № 7 „Фундаментальные принципы создания и исследование новых веществ и материалов для молекулярной электроники и спинтроники“.

Список литературы

- [1] Э.А. Силиныш, М.В. Курик, В. Чапек. *Электронные процессы в органических кристаллах* (Рига, Зинатне, 1988).
- [2] Л.В. Гуревич, Г.В. Карачевцев, В.Н. Кондратьев. *Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродства к электрону* (М., Наука, 1974).
- [3] M. Pope, C.H. Swenberg. *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers* (N.Y., Oxford, 1999).
- [4] Е.Л. Александрова. ФТП, **38** (10), 1153 (2004).
- [5] H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmid, W. Radlik. *J. Appl. Phys.*, **92**, 5259 (2002).
- [6] B. Robinson. *J. Chem. Soc.*, 3097 (1963).
- [7] L.N. Yudina, J. Bergman. *Tetrahedron*, 1265 (2003).
- [8] J. Bergman. *Tetrahedron*, **26**, 3353 (1970).
- [9] J. Tholander, J. Bergman. *Tetrahedron*, **55**, 12 595 (1999).
- [10] Y. Wu, Y. Li, S. Gardner, B.S. Ong. *J. Amer. Chem. Soc.*, **127**, 614 (2005).
- [11] Y. Li, Y. Wu, S. Gardner, B.S. Ong. *Adv. Mater.*, **17**, 849 (2005).
- [12] И.А. Акимов, Ю.А. Черкасов, М.И. Черкашин. *Сенсибилизированный фотоэффект* (М., Наука, 1980).
- [13] Е.Л. Александрова, Ю.А. Черкасов. *Опт. и спектр.*, **64**, 1047 (1988).
- [14] Е.Е. Сироткина, И.А. Гайбель, В.И. Малкова. *ЖОХ*, **50** (7), 589 (1980).
- [15] Е.Л. Александрова, Л.П. Казакова. ФТП, **35** (6), 695 (2001).
- [16] A.R. Tameev, A.A. Kozlov, A.V. Vannikov, O.K. Kocheleva, S.A. Lebedev, B.V. Kotov. *Proc. SPIE*, **3799**, 194 (1999).
- [17] J.R. Posdorfer, B. Werner, B. Wessling, S. Heun, H. Becker. *Proc. SPIE*, **5214**, 188 (2004).
- [18] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973). [Пер. с англ.: М.А. Ламперт, Р. Марк. *Current Injection in Solids* (N.Y.–London, Academic Press, 1970)].

Редактор Т.А. Полянская

Photophysical properties of indolo[3,2-b]carbazoles — a promising class of materials for optoelectronics

V.M. Svetlichnyi, E.L. Alexandrova, L.A. Miagkova, N.V. Matushina, T.N. Nekrasova, A.R. Tameev†, S.N. Stepanenko†, A.V. Vannikov, V.V. Kudryavtsev*

Institute of Macromolecular Compounds,
Russian Academy of Sciences,
199004 St. Petersburg, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

† Frumkin Institute of Physical Chemistry and
Electrochemistry,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract Comparison studies of photophysical properties of new synthesized indolo[3,2-b]carbazole and its derivatives have been performed. The photosensitivity parameters (integral photosensitivity — up to $(5-8) \cdot 10^{-2} (\text{lx}\cdot\text{s})^{-1}$, spectral photosensitivity — $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{J}$, quantum efficiency of free charge generation — 0.1) charge carrier transport ability (in 5,11-dioctyl indolo[3,2-b]carbazole, mobility $> 10^{-5} \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) exceed those for indole or carbazole derivatives and approach to the values for pentacene, the latter possesses the highest quantum efficiency of free charge generation among organic crystal materials. The enhanced photoluminescence of the synthesized indolocarbazole derivatives shows that the materials are candidates for electroluminescence devices.