

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Пространственно- и времяразрешенное фотодетектирование в амбиполярных органических полевых транзисторахВ. А. Труханов^{1,2,а}¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62.*² *Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН). Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Физическая, д. 5.*

Поступила в редакцию 17.03.2020, после доработки 23.03.2020, принята к публикации 10.04.2020.

В работе исследуются амбиполярные органические полевые транзисторы, в которых может проявляться пространственно-локализованный фотоэффект. Данный эффект заключается в том, что в канале транзистора имеется узкая светочувствительная область, в которой происходит преобразование падающего излучения в фототок и пространственным положением которой можно управлять, изменяя напряжение на затворе V_G . Благодаря этому зависимость фототока от V_G может воспроизводить пространственное распределение интенсивности падающего излучения. В настоящей работе с помощью численного моделирования исследовалось быстроедействие таких фототранзисторов, в частности показано, что время отклика на ступенчатое включение освещения составляет несколько наносекунд, а отклик на переключение напряжения V_G составляет несколько микросекунд. Также в работе исследовано, как изменение различных параметров фототранзистора влияет на его эффективность. Показано, что одновременное улучшение внешней квантовой эффективности (ВКЭ), отношения фототока к темновому току (J_{ph}/J_{dark}), пространственного разрешения и времени отклика может быть достигнуто за счет уменьшения длины канала. Также было показано, что использование материалов активного слоя, в которых фотогенерируемые электронно-дырочные пары имеют размеры более 1 нм, может обеспечить более высокие значения ВКЭ и J_{ph}/J_{dark} без какого-либо существенного снижения пространственного и временного разрешений.

Ключевые слова: органическая электроника, органические полупроводники, физика полупроводников, органический полевой транзистор, фототранзистор, пространственное разрешение, время отклика, амбиполярный транспорт зарядов.

УДК: 535.215.6. PACS: 42.79.Pw.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько десятилетий наблюдается значительный рост интереса и исследовательской активности в области органической электроники — новой отрасли науки и технологии. В органической электронике исследуются полупроводниковые материалы на основе углерода, такие как сопряженные полимеры [1], олигомеры [2], производные фуллеренов [3], нанотрубки [4], а также некоторые другие сопряженные низкомолекулярные вещества. Благодаря практически неограниченному количеству возможных молекулярных структур таких соединений возможно обеспечить точную настройку их свойств. Кроме того, такие материалы могут обеспечить низкую стоимость и простоту производства устройств на их основе. В первое время исследовались три основных типа устройств: органические солнечные фотоэлементы [5], органические светодиоды [6] и органические полевые транзисторы [7]. Впоследствии начали разрабатываться новые типы устройств, такие как органические светоизлучающие транзисторы [8], органические датчики давления [9], химические [10, 11] и биохимические [12] сенсоры, органический инжекционный лазер [13] и органические фототранзисторы [14]. Органические фототранзисторы совмещают в себе возможности фотодетектирования и управления током, а также могут иметь

гораздо большую чувствительность, чем фотодиоды. Структура органических фототранзисторов аналогична структуре органических полевых транзисторов, они представляют собой устройства с тремя электродами, два из которых — сток и исток — непосредственно контактируют с активным слоем, состоящим из органического полупроводника. Другой электрод — затвор — отделен от активного слоя слоем диэлектрика. Электрический ток, протекающий в активном слое (ток стока I_D), управляется напряжением на затворе V_G . Активный слой может состоять из монокристалла органического полупроводника, поликристаллического слоя либо слоя с объемным гетеропереходом. Поглощаемые фотоны падающего электромагнитного излучения видимого и УФ-диапазонов генерируют в активном слое фототранзистора связанные пары электрона и дырки — экситоны, которые в дальнейшем могут диссоциировать на свободные носители заряда — электрон и дырку. Тот факт, что экситоны обладают высокой энергией связи, большей, чем тепловая энергия kT , и должны быть диссоциированы на свободные носители заряда под действием внешнего электрического поля, является одним из основных особенностей органических полупроводников, ограничивающих эффективность оптоэлектронных устройств на их основе, таких как органические солнечные фотоэлементы, фотодиоды и фототранзисторы.

^а E-mail: vttrukhanov@mail.ru

Однако в данной работе будет показано, как данная особенность органических полупроводников может быть использована как преимущество при создании оптоэлектронных устройств, обладающих новыми свойствами. Также следует отметить, что эффективные фототранзисторы должны быть амбиполярными для того, чтобы позволить и электронам и дыркам дать вклад в фототок [15, 16].

В канале органического амбиполярного транзистора при его работе в амбиполярном режиме можно выделить три области: область дырочной проводимости, где концентрация дырок велика, область электронной проводимости, где концентрация электронов велика, и переходная область между первыми двумя областями. Данная переходная область обеднена носителями зарядов, поэтому в ней проводимость понижена, основное падение напряжения происходит на данной области, и напряженность электрического поля достигает максимума, тем временем, как в двух первых областях электрическое поле экранируется свободными носителями зарядов. Переходная область может выступать в качестве светочувствительной области, то есть области, где поглощенные фотоны преобразуются в свободные носители заряда с высокой квантовой эффективностью, потому что высокая напряженность электрического поля способствует эффективной диссоциации образующихся под действием света связанных электронно-дырочных пар. Пространственное положение переходной области в канале амбиполярного транзистора контролируется напряжением на затворе V_G , а ширина данной области лежит в диапазоне 15–200 нм в зависимости от параметров материалов и структуры транзистора [17]. Это означает, что транзистор может работать как одномерный сканер оптического изображения, проецированного на его канал с высоким пространственным разрешением до десятков нанометров, как было показано в предыдущей работе [18].

В настоящей работе исследуется отклик амбиполярного органического полевого транзистора на нестационарное падающее излучение и приложенное напряжение на затворе. Для этой цели была разработана численная модель на основе использованной в предыдущей работе модели фототранзистора [18], которая учитывает зависимости параметров от времени. Также было исследовано, как основные характеристики, характеризующие эффективность фототранзистора, а именно внешняя квантовая эффективность (ВКЭ), отношение фототока J_{ph} к темновому току J_{dark} (далее обозначается как нормированный фототок J_{ph}/J_{dark}), пространственное разрешение и времена отклика, изменяются при изменении задаваемых параметров модели, то есть параметров, характеризующих внешние условия, материалы и структуру фототранзистора. Среди них были выявлены параметры, изменение которых наиболее сильно влияет на характеристики фототранзистора.

1. КОНЦЕПЦИЯ ФОТОТРАНЗИСТОРА И ЕГО ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

В предыдущей работе с помощью численного моделирования было показано, что в органических полевых фототранзисторах может иметь место пространственно-локализованный фотоэффект [18].

Это означает, что в канале транзистора присутствует узкая светочувствительная область, пространственное положение которой может контролироваться V_G . Данная светочувствительная область представляет собой переходную область, обедненную носителями зарядов, и расположенную между областями электронной и дырочной проводимости; напряженность электрического поля в данной области велика и образующиеся под действием падающего излучения эффективно диссоциируют на свободные носители заряда, как схематично показано на рис. 1, а. Предполагается, что активный слой представляет собой взаимопроникающую структуру двух органических полупроводников с различными значениями электронного сродства и потенциала ионизации, один из них является электронным донором, а другой — акцептором. Данная структура называется объемным гетеропереходом и широко исследуется для создания органических фотодиодов и солнечных фотоэлементов [19]. Для моделирования генерации, транспорта и рекомбинации зарядов была разработана одномерная модель [18], которая была основана на модели органических фотодиодов и солнечных фотоэлементов. Известно, что в органических полевых транзисторах электрический ток протекает вблизи границы активного слоя и диэлектрика в ультратонком слое органического полупроводника толщиной несколько нанометров [20]. Поэтому для описания органических полевых транзисторов можно использовать одномерную модель с одной координатой x , направленной вдоль канала транзистора. Для описания генерации и рекомбинации носителей заряда использовался подход, описанный в работе Koster et al. для органических солнечных фотоэлементов с объемным гетеропереходом [21], который, в свою очередь, основан на модели Онзагера—Брауна [22]; в данном подходе образующиеся под действием падающего излучения экситоны диссоциируют на свободные носители заряда через промежуточное состояние связанных электронно-дырочных пар (e/h -пар) на границе донора и акцептора (дырка находится в доноре, а электрон — в акцепторе). Влияние напряжения на затворе V_G учтено в уравнении Пуассона как дополнительное слагаемое к объемному заряду. При использовании данной модели было показано, что в амбиполярном фототранзисторе пространственное положение фоточувствительной области определяется положением максимума напряженности электрического поля в канале (рис. 1, б) и это положение контролируется напряжением на затворе V_G ; зависимость положения от V_G является однозначной и монотонной (рис. 1, в). Зависимости нормированного фототока от V_G могут воспроизводить пространственное распределение интенсивности падающего излучения вдоль оси x , как показано на рис. 1, г.

В данной работе одномерная модель органического полевого фототранзистора, использованная в предыдущей работе [18], была дополнена путем учета зависимости от времени. Единственная пространственная координата, направленная от истока к стоку, отсчитывается от контакта электрода истока с активным слоем, то есть в этой точке $x = 0$, как показано на рис. 1. Основные уравнения модели подробно описаны в приложении. Напряжение на затворе V_G

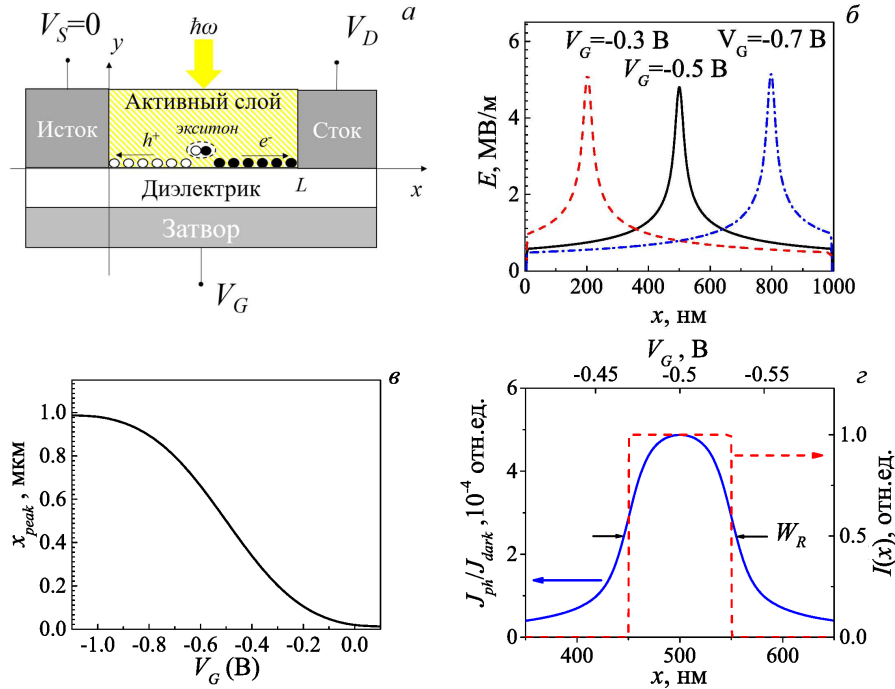


Рис. 1. Схема амбиполярного органического полевого фототранзистора (а). Напряженность электрического поля E вдоль оси x при различных значениях напряжения на затворе V_G (б). Зависимость координаты максимума напряженности электрического поля x_{peak} от V_G (в). Зависимость нормированного фототока $J_{\text{ph}}/J_{\text{dark}}$ от V_G (сплошная синяя линия) при освещении активного слоя электромагнитным излучением с прямоугольным профилем пространственного распределения интенсивности (г)

и темп генерации связанных e/h -пар G , который пропорционален интенсивности падающего электромагнитного излучения видимого или УФ-диапазона, предполагаются зависящими от времени. На рис. 1, б показаны рассчитанные зависимости напряженности электрического поля E (первая производная электрического потенциала φ по x) от x для трех различных значений V_G . В настоящей работе были исследованы времена отклика фототранзистора путем расчета временных зависимостей фототока при мгновенном включении и выключении падающего излучения, а также при мгновенном переключении напряжения на затворе V_G с одного значения на другое. Другими словами, функции $V_G(t)$ и $G(x, t)$ были описаны ступенчатыми функциями времени. Темп генерации $G(x, t)$ также был описан функцией Гаусса от x (что соответствует гауссовому пучку падающего излучения).

В модели предполагается, что все поглощаемые фотоны преобразуются в связанные e/h -пары. Толщина активного слоя полагается равной 10 нм, данное расстояние также является типичной длиной диффузии экситонов в органических полупроводниках [23], поэтому при больших толщинах активного слоя экситоны, образующиеся на расстоянии больше 10 нм от области протекания тока, не будут давать вклад в фототок. Предполагается, что фотоны поглощаются в активном слое в соответствии с законом Бугера [24], а длина поглощения полагается равной 100 нм, что является типичным для органических полупроводников. Если интенсивность падающего излучения положить равной 4.2 Вт/см^2 , то, исходя из описанных выше предположений, можно рассчитать, что средний темп генерации связанных e/h -пар в активном слое будет равен $10^{30} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Для того чтобы исследовать пространственное разрешение органического фототранзистора, в котором возможен пространственно-локализованный фотоэффект, рассчитывались зависимости $J_{\text{ph}}/J_{\text{dark}}$ от V_G при освещении канала пучком излучения с прямоугольным профилем распределения интенсивности вдоль оси x шириной 100 нм и расположенного по центру канала при $x = L/2$ (то есть пучок равноудален от стока и истока), как показано на рис. 1, г. Пространственное разрешение характеризовалось параметром $\Delta W_R = W_R - 100 \text{ нм}$, где W_R ширина на половине высоты для зависимости $J_{\text{ph}}/J_{\text{dark}}$ от V_G , при этом шкала V_G пересчитана в шкалу x в соответствии с зависимостью $x_{\text{peak}}(V_G)$, приведенной на рис. 1, в.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе при использовании описанной выше численной модели были исследованы времена отклика органического полевого фототранзистора с пространственно-локализованной светочувствительной областью. На рис. 2 показаны зависимости нормированного фототока фототранзистора от времени при различных значениях V_G , (которые определяют пространственное положение светочувствительной области в канале) при мгновенном включении падающего излучения в момент $t = 0$ с гауссовым распределением интенсивности вдоль оси x с максимумом в центре канала (равноудаленным от электродов стока и истока) и полной шириной на половине высоты, равной 200 нм.

Зависимости нормированного фототока $J_{\text{ph}}/J_{\text{dark}}$ от времени при напряжениях на затворе в диапазоне от -0.6 В до -0.4 В (что соответствует пространственному положению светочувствительной области

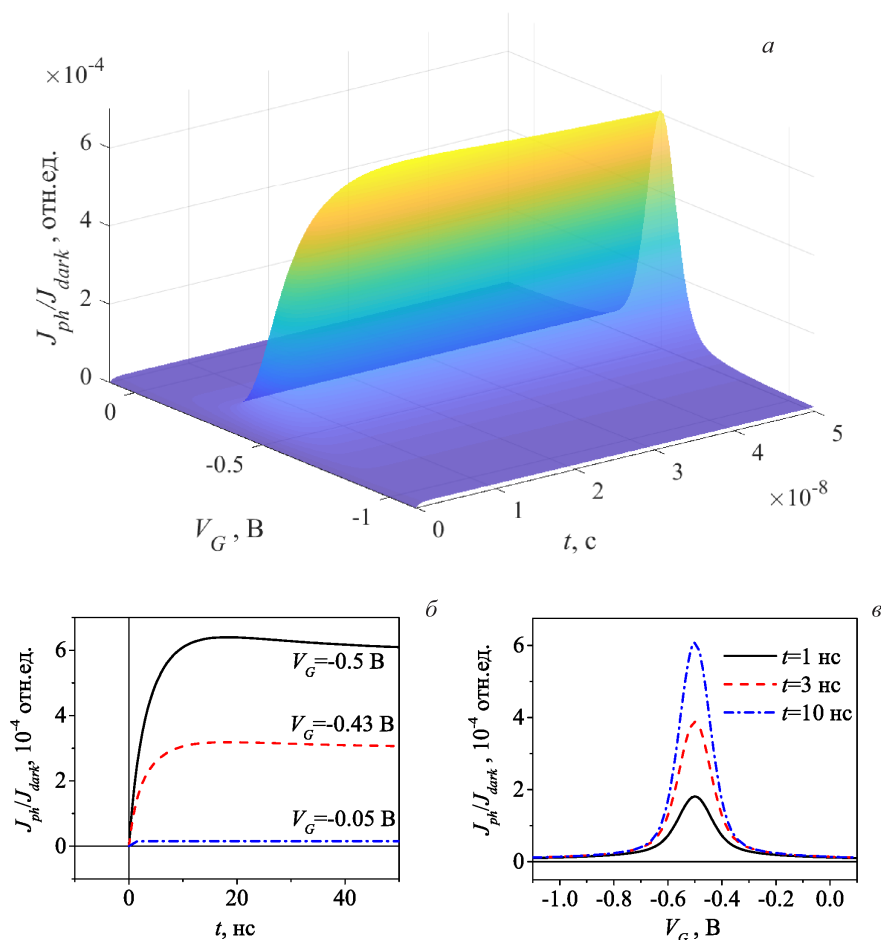


Рис. 2. Зависимости нормированного фототока J_{ph}/J_{dark} от времени t при различных значениях V_G в диапазоне от -1.1 до 0.1 В в случае мгновенного включения в момент $t = 0$ падающего излучения (а), зависимости J_{ph}/J_{dark} от времени при трех различных значениях V_G (б) и зависимости J_{ph}/J_{dark} от напряжения на затворе V_G при трех различных значениях t (в)

в центре канала, где интенсивность падающего излучения велика) могут быть аппроксимированы биэкспоненциальными функциями с характерными временами релаксации $\tau_1 = 3$ нс для компоненты с высокой амплитудой и $\tau_2 = 100$ нс для компоненты с низкой амплитудой. Такая зависимость фототока от времени может быть объяснена ненулевым временем, необходимым для того, чтобы сгенерированные заряды начали рекомбинировать: в первые моменты времени после включения падающего излучения количество образующихся под действием света зарядов очень быстро растет, так что фототок сначала даже начинает немного превышать свое стационарное значение, однако затем фототок начинает снижаться к своему стационарному значению, когда процесс рекомбинации зарядов устанавливается. При других напряжениях на затворе V_G зависимость J_{ph}/J_{dark} от времени имеет моноэкспоненциальный вид с малым характерным временем отклика (0.5 нс при $V_G = -0.05$ В), потому что в этом случае светочувствительная область расположена вблизи одного из электродов и образующиеся под действием света заряды быстро рекомбинируют. Нужно также отметить, что в случае выключения падающего излучения характер зависимости фототока от времени является похожим с такими же временами отклика.

Далее были исследованы зависимости нормированного фототока от времени при переключении напряжения на затворе V_G с одного значения на другое при освещении излучением с таким же гауссовым распределением интенсивности вдоль оси x . Данные зависимости, представленные на рис. 3, могут быть аппроксимированы экспоненциальной функцией. При большом скачке напряжения на затворе с -0.05 В до -0.5 В время релаксации (время отклика) τ_v составляет 2.5 мкс, а при малом изменении напряжения на V_G с -0.43 В до -0.44 В время релаксации составляет 4.6 мкс. Гораздо большие времена отклика в случае переключения напряжения на затворе по сравнению со случаем включения/выключения освещения могут быть объяснены тем фактом, что переключение напряжения на затворе приводит к перераспределению большого количества зарядов во всем канале полевого транзистора, тогда как включение либо выключение освещения приводит к перераспределению заряда в основном в небольшой светочувствительной области, определяемой шириной пика зависимости напряженности электрического поля от x .

Далее было проведено исследование, как изменение различных параметров, характеризующих внешние условия, материалы и структуру фототран-

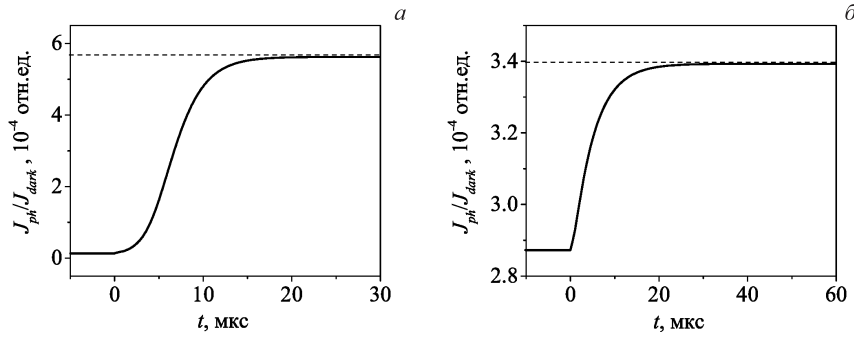


Рис. 3. Зависимости нормированного фототока фототранзистора J_{ph}/J_{dark} от времени t после мгновенного переключения напряжения на затворе V_G с -0.05 В до -0.5 В (а) и с -0.43 В до -0.44 В (б) в момент $t = 0$. Пунктирные линии соответствуют стационарным значениям J_{ph}/J_{dark} при конечном значении V_G

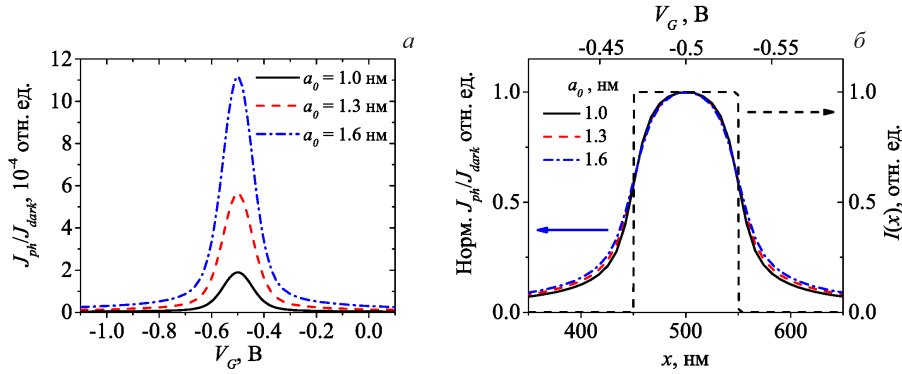


Рис. 4. Зависимости нормированного фототока J_{ph}/J_{dark} от V_G при падающем излучении с гауссовой (а) и прямоугольной (б) формами распределения интенсивности вдоль x при различных значениях размера связанных e/h -пар a_0 . На панели (б) значения J_{ph}/J_{dark} нормированы на максимум

зистора (то есть задаваемых параметров модели), влияет на его эффективность. Эффективность фототранзистора характеризовалась ВКЭ, нормированным фототоком J_{ph}/J_{dark} , пространственным разрешением и временами отклика. Внешняя квантовая эффективность рассчитывалась как отношение числа образующихся под действием света зарядов, дающих вклад в фототок, к числу падающих фотонов. Таким образом, ВКЭ пропорционально фототоку J_{ph} , деленному на максимальное по x значение G_0 темпа генерации связанных e/h -пар $G(x)$. ВКЭ и нормированный фототок рассчитывались в случае падающего излучения с гауссовым распределением интенсивности по оси x с шириной на полувысоте 200 нм и максимумом в центре канала. Пространственное разрешение характеризовалось параметром ΔW_R , введенным выше, снижение этого параметра соответствует улучшению пространственного разрешения. Времена отклика фототранзистора рассчитаны по формулам, описанным в приложении.

Исследовались зависимости описанных выше характеристик, а именно зависимости нормированного фототока J_{ph}/J_{dark} , описывающего пространственное разрешение параметра ΔW_R , времен отклика τ_1 и τ_2 на включение освещения и времен отклика τ_v на переключение напряжения на затворе от каждого из задаваемых параметров модели. Данные параметры перечислены в дополнительных материалах, там же приведены рассчитанные зависимости. Здесь обсуждаются результаты для наиболее сильно влияющих параметров. Относительная диэлектрическая проницаемость активного слоя ϵ и удельная электрическая

емкость затвора фототранзистора C_S оказывают сильное влияние на фототок и пространственное разрешение фототранзистора. Однако их влияние неоднозначно: если при изменении данных параметров происходит увеличение фототока, то пространственное разрешение ухудшается, и наоборот. Такое поведение может быть объяснено изменением ширины светочувствительной области, соответствующей максимуму напряженности электрического поля.

В случае изменения параметра a_0 — размера связанных e/h -пар — ситуация иная, увеличение a_0 ведет к росту фототока — более чем в 5 раз при 1.6-кратном увеличении a_0 , как изображено на рис. 4, а, а пространственное разрешение почти не изменяется (рис. 4, б). Это происходит потому, что ширина светочувствительной области почти не изменяется, тогда как эффективность разделения связанных e/h -пар на свободные носители заряда существенно возрастает благодаря более резкой зависимости скорости диссоциации связанных e/h -пар k_{diss} от напряженности электрического поля E при большем a_0 .

Необходимо отметить, что в случае изменения рассмотренных выше трех параметров, ϵ , C_S и a_0 , ВКЭ изменяется практически так же, как и J_{ph}/J_{dark} , так как темновой ток почти не изменяется при вариации этих параметров.

Зависимость J_{ph}/J_{dark} от параметра G_0 , который пропорционален интенсивности падающего излучения, может быть аппроксимирована степенной функцией с показателем 0.87, то есть зависимость является сублинейной. ВКЭ снижается с увеличением G_0 . Сублинейные зависимости фототока

Таблица. Влияние различных параметров на эффективность фототранзистора, характеризующую ВКЭ, J_{ph}/J_{dark} , пространственным разрешением и временем отклика

Параметр	Символ	ВКЭ	J_{ph}/J_{dark}	Простр. разрешение	Время отклика
Длина канала	L	—	—	—	—
Диэлектрическая проницаемость активного слоя	ε	++	++	—	—
Температура	T	+	+	—	—
Подвижность электронов и дырок	$\mu_{n,p}$	—	0	—	++
Толщина канала	d	++	+	—	—
Удельная электрическая емкость затвора	C_S	—	—	++	+
Энергетические барьеры на электродах	$\Delta\Phi_{1,2}$	—	—	—	0
Ширина запрещенной зоны	E_g	0	0	0	0
Размер связанных e/h-пар	a_0	++	++	—	—
Скорость распада связанных e/h-пар	k_f	—	—	+	+
Максимальный темп генерации связанных e/h-пар	G_0	—	+	—	—
Плотности состояний	$N_{c,v}$	+	—	+	+
Напряжение на стоке	$ V_D $	+	—	+	++

от интенсивности падающего света часто имеют место в органических фотодиодах и солнечных фотоэлементах и могут быть объяснены влиянием объемного заряда [25].

Времена отклика на включение падающего излучения сильно зависят от диэлектрической проницаемости активного слоя ε , удельной электрической емкости затвора C_S , подвижностей электронов и дырок $\mu_{n,p}$ и напряжения на стоке V_D . В дополнительных материалах на рис. П2 показаны зависимости фототока от времени при различных значениях параметров, соответствующие времена $\tau_{1,2}$ даны в приложении в табл. П1. Влияние ε и C_S на времена отклика могут быть объяснены изменением ширины светочувствительной области, более широкая светочувствительная область ведет к большим временам отклика. Подвижности носителей заряда $\mu_{n,p}$ и напряжение на стоке V_D напрямую связаны со скоростью носителей заряда, поэтому эти параметры также сильно влияют на времена отклика.

В случае переключения напряжения на затворе время отклика τ_v существенно зависит только от трех следующих параметров: длины канала L , подвижности электронов и дырок $\mu_{n,p}$ и напряжения на стоке V_D ; времена отклика для различных значений параметров приведены в приложении в табл. П2 и П3. Изменения остальных параметров влияют на τ_v незначительно. Из полученных данных можно сделать вывод, что данное время отклика τ_v пропорционально времени, которое необходимо для прохождения носителя заряда вдоль канала от истока к стоку:

$$\tau_v \sim \frac{L}{v_{n,p}} = \frac{L}{\mu_{n,p}\langle E \rangle} = \frac{L^2}{\mu_{n,p}V_D},$$

где $v_{n,p}$ — дрейфовые скорости электронов и дырок и $\langle E \rangle$ — средняя напряженность электрического поля в канале вдоль оси x .

Исходя из полученных зависимостей были сделаны заключения о том, как различные параметры влияют на эффективность фототранзистора, данные приведены в таблице. Символы + (++) обозначают, что соответствующая характеристика (существенно) улучшается при увеличении соответствующего

параметра, символы — (—) обозначают (существенное) ухудшение соответствующей характеристики при увеличении соответствующего параметра, «ноль» означает, что параметр не оказывает влияния на соответствующую характеристику.

Как видно из таблицы, вариация только одного параметра, а именно уменьшение длины канала L , приводит к одновременному улучшению всех характеристик фототранзистора. Изменение остальных задаваемых параметров влияет на эффективность фототранзистора неоднозначно, например увеличение диэлектрической проницаемости активного слоя ведет к значительному увеличению ВКЭ и J_{ph}/J_{dark} , однако в то же время приводит к сильному ухудшению пространственного разрешения и быстродействия. Влияние размера связанных e/h-пар является наиболее интересным: увеличение этого параметра ведет к значительному росту ВКЭ и J_{ph}/J_{dark} и в то же время ухудшение пространственного разрешения и быстродействия незначительно. Параметр a_0 характеризует, насколько сильно зависит скорость диссоциации связанных e/h-пар от напряженности электрического поля. Поэтому можно сделать вывод, что для создания высокоэффективных фототранзисторов с пространственно-локализованным фотоэффектом будут предпочтительны органические полупроводники (и их донорно-акцепторные смеси с объемным гетеропереходом), в которых зависимость вероятности диссоциации связанных пар электронов и дырок от электрического поля наиболее резкая.

Фототранзистор с параметрами структуры и материалов, численные значения которых предложены в предыдущей работе [18], обладает высоким пространственным разрешением, позволяющим, в частности, воспроизводить пространственное положение падающего гауссова пучка с точностью до десятков нанометров. Также фототранзистор с такими параметрами имеет небольшие, но приемлемые с точки зрения измерений значения фототока, ВКЭ и J_{ph}/J_{dark} . Кроме того, фототранзистор с такими параметрами имеет высокое быстродействие с характерными временами отклика порядка нескольких микросекунд. Таким образом, численные значения задаваемых параметров из предыдущей работы могут служить первым приближением для создания

экспериментальных фототранзисторов для исследования в них пространственно-локализованного фотоэффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовались амбиполярные органически полые фототранзисторы, в которых может присутствовать пространственно-локализованная светочувствительная область, пространственное положение которой может контролироваться напряжением на затворе. Такие фототранзисторы могут воспроизводить пространственное распределение интенсивности падающего излучения. С помощью численного моделирования было показано, что их времена отклика могут составлять несколько наносекунд в случае изменения интенсивности освещения и несколько микросекунд в случае изменения напряжения на затворе. Были получены зависимости характеристик фототранзистора, описывающих его эффективность, а именно ВКЭ, нормированного фототока, пространственного разрешения и времен отклика, от задаваемых параметров модели, описывающих внешние условия, структуру и материалы фототранзистора. Обнаружено, что снижение длины канала может приводить к всестороннему увеличению эффективности фототранзистора. Варьирование диэлектрической проницаемости активного слоя и удельной электрической емкости затвора может значительно увеличить фототок, но вместе с тем значительно ухудшается пространственное и временное разрешение. Такое поведение объясняется изменением размера светочувствительной области при изменении этих параметров. Увеличение размера связанных электронно-дырочных пар ведет к увеличению фототока и ВКЭ без существенного снижения пространственного разрешения и быстродействия. Результаты численного моделирования, представленные в данной работе, могут способствовать разработке новых типов органических оптоэлектронных устройств, обладающих высоким пространственным и временным разрешениями.

Автор выражает благодарность профессору Д. Ю. Парашуку за ценные консультации по теме работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 18-79-00341).

Приложение А: Основные уравнения модели органического полевого фототранзистора

Модель основана на уравнении Пуассона для электрического потенциала, уравнениях непрерывности для плотностей токов носителей заряда и уравнениях, описывающих дрейф и диффузию носителей заряда с одной пространственной координатой x , направленной вдоль канала от электрода истока к электроду стока. Все неизвестные функции модели, а именно электрический потенциал φ , концентрации свободных электронов n и дырок p , плотности токов электронов j_n и дырок j_p предполагаются зависящими также и от времени t (помимо координаты x), а их полные производные по x заменены частными производными по x . Также в уравнениях непрерывности для плотностей токов добавлены частные

производные по времени от концентраций электронов и дырок. В результате система основных уравнений модели имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} [p(x, t) - n(x, t)] + \frac{C_S}{\varepsilon \varepsilon_0 d} [\varphi(x, t) - V_G(t)], \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{e} \frac{\partial j_p}{\partial x} = P(E)G(x, t) - (1 - P(E))R(x, t), \\ \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} = P(E)G(x, t) - (1 - P(E))R(x, t), \\ j_n(x, t) = e\mu_n n(x, t) \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mu_n kT \frac{\partial n}{\partial x}, \\ j_p(x, t) = e\mu_p p(x, t) \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \mu_p kT \frac{\partial p}{\partial x}, \end{cases}$$

где e — заряд электрона, ε_0 — электрическая постоянная, ε — диэлектрическая проницаемость активного слоя, C_S — удельная электрическая емкость системы активный слой–диэлектрик–затвор, d — толщина канала, P — вероятность диссоциации связанных e/h -пар, E — напряженность электрического поля, G и R — темпы генерации и рекомбинации свободных электронов и дырок в единице объема в единицу времени, $\mu_{n,p}$ — подвижности электронов и дырок, k — постоянная Больцмана, T — температура активного слоя. При решении данной системы уравнений исследуемый временной период разбивался на некоторое количество отдельных моментов времени с шагом Δt и для каждого такого момента времени система решалась так же, как это было описано в предыдущей работе [18].

Приложение Б: Внешняя квантовая эффективность, нормированный фототок и быстродействие фототранзистора

Задаваемые параметры модели следующие: длина канала L , диэлектрическая проницаемость активного слоя ε , температура T , подвижности электронов μ_n и дырок μ_p , удельная электрическая емкость C_S системы активный слой–диэлектрик–затвор, энергетические барьеры на электродах истока $\Delta\Phi_1$ и стока $\Delta\Phi_2$, эффективная ширина запрещенной зоны E_g (в случае активного слоя с объемным гетеропереходом она выводится исходя из энергетических уровней компонентов активного слоя), размер связанных e/h -пар a_0 , скорость распада связанных e/h -пар k_f , темп генерации связанных e/h -пар G_0 (максимальный по x , связан с интенсивностью падающего излучения), плотности состояний в зоне проводимости N_c и в валентной зоне N_v , напряжение на стоке V_D . Нужно отметить, что влияние изменения толщины канала d (толщины слоя, в котором протекает ток) аналогично влиянию изменения C_S , потому что в уравнениях модели эти два параметра содержатся только в виде отношения C_S/d .

На рис. П1 показаны зависимости максимальной внешней квантовой эффективности (ВКЭ), максимального по V_G нормированного фототока и параметра ΔW_R (характеризующего пространственное разрешение) от различных задаваемых параметров модели, которые описывают внешние условия, материалы и структуру фототранзистора. Возрастание параметра ΔW_R означает ухудшение пространственного разрешения. Когда один из задаваемых

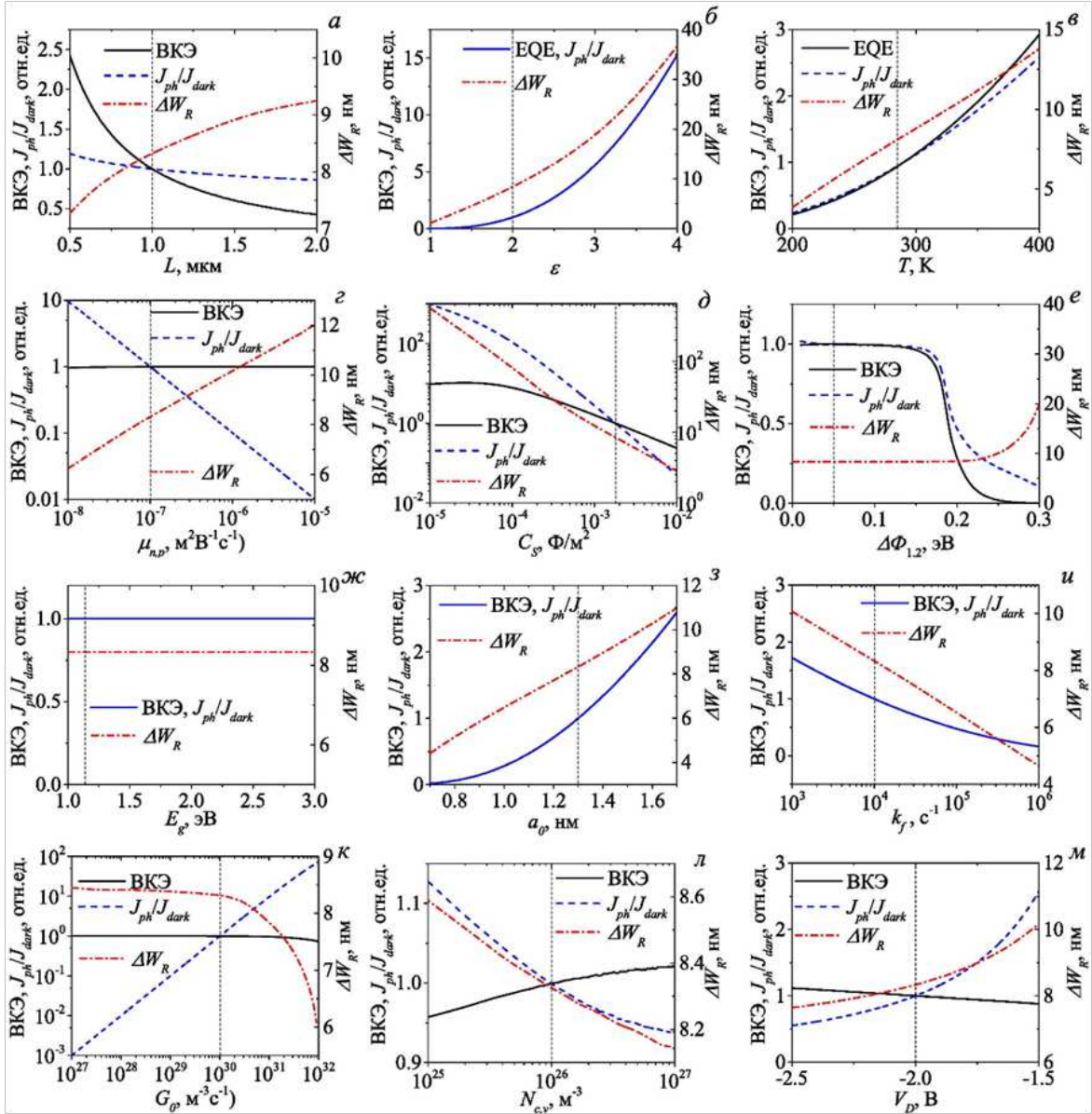


Рис. П1. Зависимости ВКЭ (черные сплошные линии, левая ось ординат), нормированного фототока J_{ph}/J_{dark} (синие пунктирные линии, левая ось ординат) и параметра ΔW_R (красные штрихпунктирные линии, правая ось ординат) от задаваемых параметров модели. Вертикальные пунктирные линии соответствуют изначальным значениям параметров

параметров модели варьировался, остальные параметры оставались неизменными и равными своим изначальным значениям, приведенным в предыдущей работе [18].

На рис. П2 приведены зависимости фототока J_{ph} от времени t для различных значений задаваемых параметров для случая мгновенного включения освещения. Фототок J_{ph} нормирован на свое стационарное значение (то есть при $t \rightarrow \infty$). Данные зависимости рассчитаны при $V_G = -0.5$ В и $V_D = -2$ В, если не указаны другие значения.

Приложение В: Определение времен отклика фототранзистора

Для того, чтобы исследовать изменение времен отклика фототранзистора, были рассчитаны зависимости фототока от времени в случае мгновенного включения падающего излучения с гауссовским распределением интенсивности по x как описано выше,

а также в случаях мгновенного переключения напряжения на затворе в момент $t = 0$ с -0.05 В до -0.5 В и с -0.43 В до -0.44 В. Далее из полученных зависимостей $J_{ph}(t)$ были рассчитаны времена отклика из аппроксимации к биэкспоненциальной функции

$$J_{ph}(t) = Ae^{-t/\tau_1} + Be^{-t/\tau_2} \quad (\text{П1})$$

в случае включения освещения и моноэкспоненциальной функции

$$J_{ph}(t)/J_{dark}(t) = Ae^{-t/\tau_v} \quad (\text{П2})$$

в случае переключения V_G . Снижение времен релаксации $\tau_{1,2,v}$ соответствует улучшению быстродействия фототранзистора.

В табл. П1 представлены рассчитанные путем аппроксимации по формуле (П1) характерные времена отклика $\tau_{1,2}$ при изменении каждого из задаваемых параметров в сторону увеличения или уменьшения

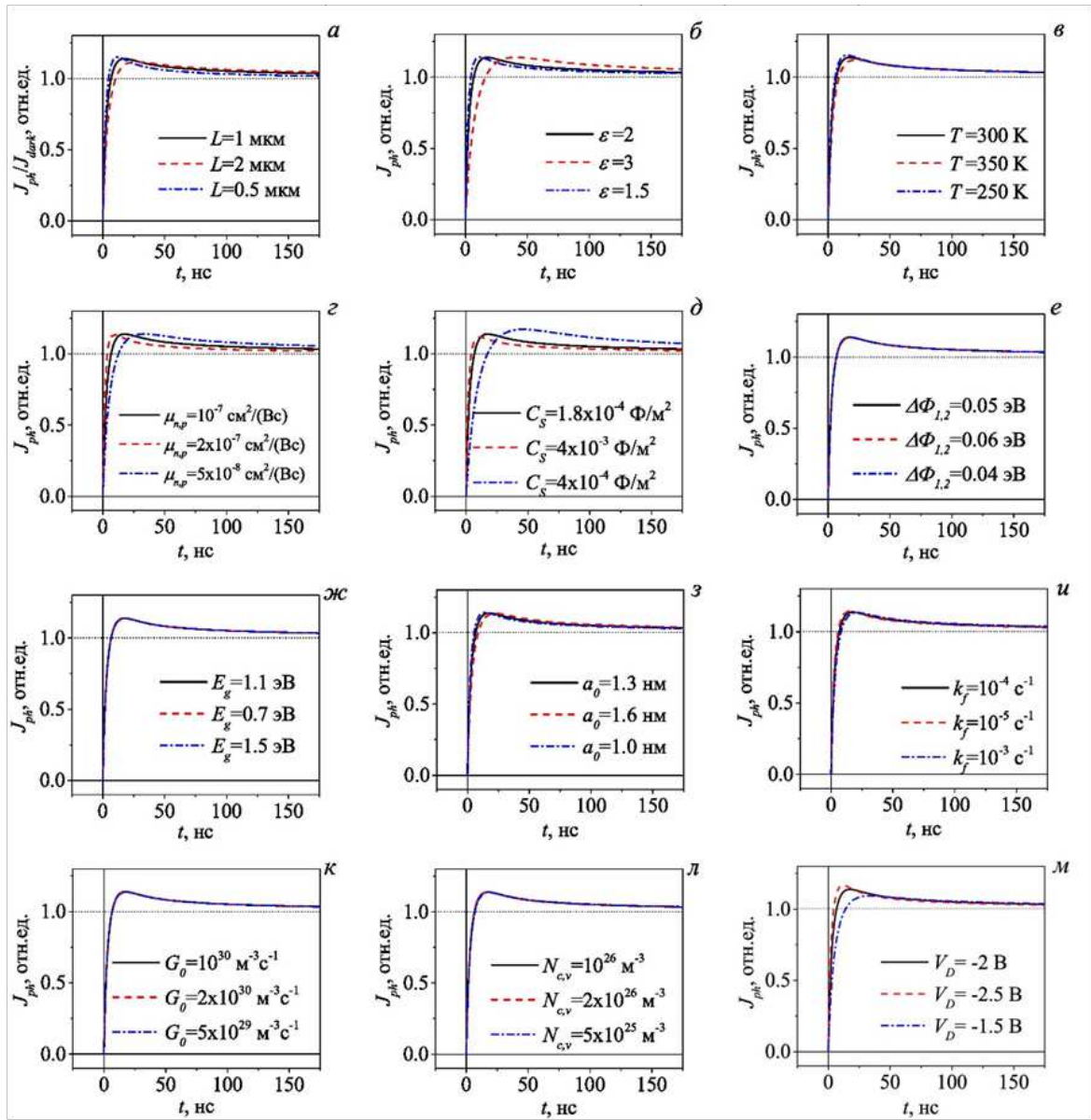


Рис. П2. Зависимости фототока J_{ph} от времени t при различных значениях задаваемых параметров модели. Фототок нормирован на стационарное значение, обозначенное горизонтальной пунктирной линией

Таблица П1. Времена отклика $\tau_{1,2}$ на включение падающего излучения при различных значениях задаваемых параметров

Параметр	Значение	τ_1 , нс	τ_2 , нс	τ_2/τ_1	Параметр	Значение	τ_1 , нс	τ_2 , нс	τ_2/τ_1
L , мкм	0.5	2.16 ± 0.04	52 ± 5	24.1	E_g , эВ	0.7	2.26 ± 0.04	69 ± 7	30.5
	1.0	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		1.1	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	2.0	4.13 ± 0.09	177 ± 40	42.9		1.5	4.33 ± 0.10	184 ± 50	42.5
ε	1.5	1.93 ± 0.04	70 ± 8	36.3	a_0 , нм	1.0	2.39 ± 0.04	82 ± 9	34.3
	2.0	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		1.3	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	3.0	7.50 ± 0.12	165 ± 23	22		1.6	3.80 ± 0.08	115 ± 17	30.3
T , К	250	2.65 ± 0.05	83 ± 9	31.3	k_f , с ⁻¹	10^3	3.50 ± 0.07	110 ± 15	31.4
	290	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		10^4	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	350	3.64 ± 0.07	119 ± 19	32.7		10^5	2.57 ± 0.05	84 ± 10	32.7
$\mu_{n,p}$, см ² /Вс	5×10^{-8}	5.55 ± 0.12	180 ± 37	32.4	G_0 , м ⁻³ с ⁻¹	5×10^{29}	2.96 ± 0.06	96 ± 12	32.9
	1×10^{-7}	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		1×10^{30}	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	2×10^{-7}	1.58 ± 0.03	54 ± 6	34.2		2×10^{30}	2.95 ± 0.06	98 ± 13	32.9
C_s , Ф/м ²	4.0×10^{-4}	9.14 ± 0.14	161 ± 17	17.6	$N_{c,v}$, м ⁻³	5×10^{25}	3.03 ± 0.06	101 ± 13	33.3
	1.8×10^{-3}	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		1×10^{26}	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	4.0×10^{-3}	1.66 ± 0.04	78 ± 13	47		2×10^{26}	2.89 ± 0.05	93 ± 12	32.2
$\Delta\Phi_{1,2}$, эВ	0.04	2.96 ± 0.06	96 ± 12	32.9	V_D , В	-1.5	4.97 ± 0.11	248 ± 100	32.2
	0.05	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		-2.0	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9
	0.06	2.95 ± 0.06	97 ± 12	32.9		-2.5	2.14 ± 0.04	64 ± 6	29.9

Таблица П2. Время отклика τ_v при большом скачке напряжения на затворе величиной в 0.45 В при различных значениях задаваемых параметров

Параметр	Значение	τ_v , мкс	Параметр	Значение	τ_v , мкс
L , мкс	0.5	0.686 ± 0.005	E_g , эВ	0.7	2.458 ± 0.009
	1.0	2.459 ± 0.009		1.1	2.459 ± 0.009
	2.0	9.55 ± 0.07		1.5	2.459 ± 0.009
ε	1.5	2.475 ± 0.010	a_0 , нм	1.0	2.465 ± 0.010
	2.0	2.459 ± 0.009		1.3	2.459 ± 0.009
	2.5	2.441 ± 0.008		1.6	2.451 ± 0.009
T , К	250	2.556 ± 0.012	k_f , с ⁻¹	10^3	2.454 ± 0.009
	290	2.459 ± 0.009		10^4	2.459 ± 0.009
	350	2.329 ± 0.007		10^5	2.463 ± 0.010
$\mu_{n,p}$, см ² /Вс	5×10^{-8}	4.713 ± 0.030	G_0 , м ⁻³ с ⁻¹	5×10^{29}	2.459 ± 0.009
	1×10^{-7}	2.459 ± 0.009		1×10^{30}	2.459 ± 0.009
	2×10^{-7}	1.291 ± 0.007		2×10^{30}	2.457 ± 0.009
C_S , Ф/м ²	4.0×10^{-4}	2.244 ± 0.004	$N_{c,v}$, м ⁻³	5×10^{25}	2.528 ± 0.011
	1.8×10^{-3}	2.459 ± 0.009		1×10^{26}	2.459 ± 0.009
	4.0×10^{-3}	2.563 ± 0.012		2×10^{26}	2.400 ± 0.008
$\Delta\Phi_{1,2}$, эВ	0.04	2.467 ± 0.010	V_D , В	-1.5	3.869 ± 0.013
	0.05	2.459 ± 0.009		-2.0	2.459 ± 0.009
	0.06	2.457 ± 0.009		-2.5	1.776 ± 0.003

Таблица П3. Время отклика τ_v при малом изменении напряжения на затворе величиной 0.01 В при различных значениях задаваемых параметров

Параметр	Значение	τ_v , мкс	Параметр	Значение	τ_v , мкс
L , мкм	0.5	1.312 ± 0.004	E_g , эВ	0.7	4.613 ± 0.011
	1.0	4.599 ± 0.014		1.1	4.599 ± 0.014
	2.0	16.96 ± 0.21		1.5	4.651 ± 0.010
ε	1.5	4.666 ± 0.005	a_0 , нм	1.0	4.607 ± 0.016
	2.0	4.599 ± 0.014		1.3	4.599 ± 0.014
	2.5	4.576 ± 0.012		1.6	4.600 ± 0.011
T , К	250	4.746 ± 0.016	k_f , с ⁻¹	10^3	4.604 ± 0.011
	290	4.599 ± 0.014		10^4	4.599 ± 0.014
	350	4.397 ± 0.012		10^5	4.631 ± 0.008
$\mu_{n,p}$, см ² /Вс	5×10^{-8}	8.39 ± 0.10	G_0 , м ⁻³ с ⁻¹	5×10^{29}	4.590 ± 0.016
	1×10^{-7}	4.599 ± 0.014		1×10^{30}	4.599 ± 0.014
	2×10^{-7}	2.460 ± 0.008		2×10^{30}	4.607 ± 0.013
C_S , Ф/м ²	4.0×10^{-4}	4.269 ± 0.010	$N_{c,v}$, м ⁻³	5×10^{25}	4.718 ± 0.013
	1.8×10^{-3}	4.599 ± 0.014		1×10^{26}	4.599 ± 0.014
	4.0×10^{-3}	4.763 ± 0.018		2×10^{26}	4.521 ± 0.010
$\Delta\Phi_{1,2}$, эВ	0.04	4.610 ± 0.013	V_D , В	-1.5	7.07 ± 0.06
	0.05	4.599 ± 0.014		-2.0	4.599 ± 0.014
	0.06	4.604 ± 0.013		-2.5	3.407 ± 0.020

(при изменении одного из параметров остальные параметры оставались неизменными и равными своим изначальным значениям).

Далее исследовалось влияние изменения задаваемых параметров на времена отклика при переключении напряжения на затворе с -0.05 В до -0.5 В ($\Delta V_G = 0.45$ В). Зависимости фототока были аппроксимированы экспоненциальной функцией согласно (П2) и были рассчитаны времена отклика τ_v ,

которые представлены в табл. П2.

Также было исследовано влияние изменения задаваемых параметров на время отклика в случае малого изменения напряжения на затворе с -0.43 В до -0.44 В ($\Delta V_G = 0.01$ В). Как и в предыдущем случае, зависимости фототока от времени были аппроксимированы экспоненциальной функцией согласно формуле (П2), откуда были рассчитаны времена отклика, приведенные в табл. П3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Facchetti A.* // Chem. Mater. 2011. **23**. P. 733.
2. *Murphy A. R., Fréchet J. M. J.* // Chem. Rev. 2007. **107**. P. 1066.
3. *Hummelen J. C., Knight B. W., LePeq F.* et al. // J. Org. Chem. 1995. **60**. P. 532.
4. *Bo X.-Z., Lee C. Y., Strano M. S.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. **86**. P. 182102.
5. *Yu G., Gao J., Hummelen J. C.* et al. // Science 1995. **270**. P. 1789.
6. *Burroughes J. H., Bradley D. D. C., Brown A. R.* et al. // Nature 1990. **347**. P. 539.
7. *Horowitz G.* // Adv. Mater. 1998. **10**. P. 365–377.
8. *Hepp A., Heil H., Weise W.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2003. **91**. P. 157406.
9. *Sokolov A. N., Tee B. C., Bettinger C. J.* et al. // Acc. Chem. Res. 2012. **45**. P. 361.
10. *Torsi L., Dodabalapur A., Sabbatini L., Zambonin P. G.* // Sens. Actuat. B Chem. 2000. **67**. P. 312.
11. *Комолов А. С., Герасимова Н. Б., Лазнева Э. Ф.* и др. // ЖТФ 2009. **79**. С. 135.
12. *Cramer T., Campana A., Leonardi F.* et al. // J. Mater. Chem. B 2013. **1**. P. 3728.
13. *Kuehne A. J. C., Gather M. C.* // Chem. Rev. 2016. **116**. P. 12823.
14. *Baeg K.-J., Binda M., Natali D.* et al. // Adv. Mater. 2013. **25**. P. 4267.
15. *Алешин А. Н., Щербаков И. П., Федичкин Ф. С.* // ФТТ 2012. **54**. С. 1586.
16. *Nam S., Han H., Seo J.* et al. // Adv. Electron. Mater. 2016. **2**. P. 1600264.
17. *Kemerink M., Charrier D. S. H., Smits E. C. P.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. **93**. P. 033312.
18. *Труханов В. А.* // Письма в ЖЭТФ. 2019. **109**, № 12. С. 815.
19. *Nelson J.* // Mater. Today. 2011. **14**. P. 462.
20. *Horowitz G.* // J. Mater. Res. 2004. **19**. P. 1946.
21. *Koster L. J. A., Smits E. C. P., Mihailetschi V. D., Blom P. W. M.* // Phys. Rev. B. 2005. **72**. P. 085205.
22. *Braun C. L.* // J. Chem. Phys. 1984. **80**. P. 4157.
23. *Shaw P. E., Ruseckas A., Samuel I. D. W.* // Adv. Mater. 2008. **20**. P. 3516.
24. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. Т. IV. Оптика. М., 2005.
25. *Koster L. J. A., Mihailetschi V. D., Xie H., Blom P. W. M.* // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**. P. 203502.

Space-and-Time-Resolved Photodetection in Ambipolar Organic Field-Effect Transistors

V. A. Trukhanov^{1,2}¹*Chair of General Physics and Wave Processes, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*²*Institute of Spectroscopy of the Russian Academy of Sciences. Moscow 108840, Russia.*E-mail: vtrukhanov@mail.ru.

This article investigates ambipolar organic field-effect transistors, which can exhibit a spatially localized photoelectric effect. This effect consists in the fact that a transistor channel has a narrow photosensitive region in which incident radiation is converted into a photocurrent. The spatial position of which can be controlled by changing the gate voltage V_G . Due to this, the dependence of the photocurrent on V_G can reproduce the spatial distribution of the incident radiation intensity. In this work, the response time of phototransistors is studied by numerical modeling. In particular, it is shown that the response time to turning light on in a stepwise manner is a few nanoseconds, while the response time to V_G voltage switching is a few microseconds. The article also studies how changes in various parameters of a phototransistor affect its efficiency. It is shown that the simultaneous improvement of external quantum efficiency (EQE), the photocurrent-to-dark-current-ratio (J_{ph}/J_{dark}), the spatial resolution, and the response time can be achieved by reducing the channel length. It is also shown that the use of active layer materials in which photogenerated electron–hole pairs are larger than 1 nm can provide higher EQE values and J_{ph}/J_{dark} without any significant reduction in spatial and temporal resolution.

Keywords: organic electronics, organic semiconductors, semiconductor physics, organic field-effect transistor, phototransistor, spatial resolution, response time, ambipolar charge transport.

PACS: 42.79.Pw.

Received 17 March 2020.

English version: [Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 4. Pp. 342–353.](#)

Сведения об авторе

Труханов Василий Андреевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-22-28, e-mail: vtrukhanov@mail.ru.