Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 12, с. 815 – 820

Пространственно-локализованный фотоэффект в амбиполярных органических полевых фототранзисторах[1)]

В. А. Труханов[2)]

Институт спектроскопии РАН (ИСАН), 108840 Москва, Троицк, Россия

Физический факультет и Международный лазерный центр МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 10 апреля 2019 г.
После переработки 24 апреля 2019 г.
Принята к публикации 30 апреля 2019 г.

С помощью численного моделирования показано, что в амбиполярных фототранзисторах на основе органических полупроводников при определенных значениях параметров материалов и структуры преобразование падающего излучения в фототок происходит не одинаково по всей длине канала, а имеется узкая область, где такое преобразование идет эффективно, причем пространственное положение этой фоточувствительной области вдоль координаты x, направленной от стока к истоку, контролируется напряжением на затворе V_G. Возникновение такой области объясняется тем, что в ней повышена напряженность электрического поля, которая сильно влияет на эффективность разделения фотогенерируемых зарядов в органических полупроводниках. Определены зависимости пространственного положения фоточувствительной области от V_G. Рассчитаны зависимости отношения фототока к темновому току от V_G для различных профилей пространственного распределения интенсивности падающего излучения (ступенчатого, прямоугольного и гауссова). Показано, что при преобразовании шкалы V_G в шкалу x данные зависимости воспроизводят с высокой степенью точности профили падающего излучения.

DOI: 10.1134/S0370274X19120026

1. Введение. Органические полупроводники такие, как сопряженные полимеры и олигомеры, являются перспективной основой для разработки таких устройств, как фототранзисторы, благодаря возможности точной настройки их электронных и оптических свойств путем изменения их молекулярной структуры, а также благодаря низкой стоимости, простоте производства и замечательным механическим свойствам [1, 2]. Фототранзисторы по своей структуре аналогичны полевым транзисторам, они состоят из слоев органического полупроводника (активного слоя), слоя диэлектрика, и имеют три электрода – сток, исток и затвор, как показано на рис. 1a. Сток и исток непосредственно контактируют с активным слоем, а затвор отделен от активного слоя слоем диэлектрика. Путем изменения напряжения на затворе можно управлять током между стоком и истоком и чувствительностью фототранзисторов (отношением фототока к мощности падающего излучения). Таким образом, фототранзисторы сочетают в себе свойства полевых транзисторов и фотодиодов. Первые фототранзисторы были униполярными, канал которых имел p-тип проводимости (дырочная проводимость), однако эффективность таких фототранзисторов была невелика из-за потерь неоснов-

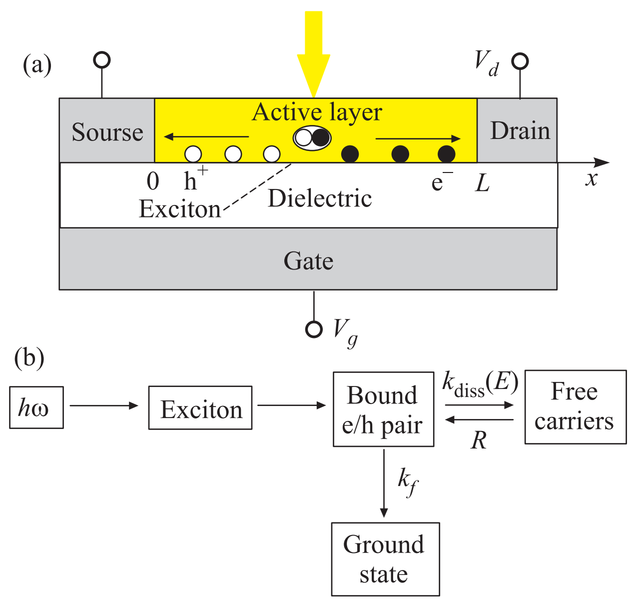

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Схематическое изображение моделируемого органического полевого фототранзистора. (b) – Схема процесса разделения заряда на гетеропереходе

[1)]См. дополнительные материалы к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru

[2)]e-mail: vtrukhanov@mail.ru

ных носителей при рекомбинации зарядов [3, 4]. Более эффективными являются амбиполярные фототранзисторы [5–8], так как оба типа генерируемых под действием света носителей заряда – электроны и дырки – могут давать вклад в фототок. Несмотря на широкий разброс значений эффективности экспериментальных образцов фототранзисторов на основе органических полупроводников, разрабатываемых в мире, тем не менее, лучшие из них по чувствительности превосходят фототранзисторы на основе аморфного кремния [9, 10].

Канал амбиполярных транзисторов в случае режима амбиполярной проводимости можно разделить на три области – область дырочной проводимости, область электронной проводимости, и переходная область, расположенная между первыми двумя областями. Переходная область обеднена носителями заряда, поэтому на ней происходит основное падение напряжения, следовательно, напряженность электрического поля достигает максимума. Поэтому данная область может быть фоточувствительной областью (т.е. областью, где поглощаемые фотоны эффективно преобразуются в свободные носители заряда), так как повышенная напряженность электрического поля способствует эффективному разделению фотогенерируемых зарядов. Положение переходной области в канале транзистора зависит от напряжения на затворе, а ее ширина может достигать 15–200 нм в зависимости от параметров структуры и свойств материалов фототранзистора [11]. Это означает, что фототранзистор может работать как одномерный сканер оптического изображения, проецированного на его канал, обладающий высоким пространственным разрешением. Пространственное разрешение будет определяться, с одной стороны, длиной волны падающего излучения, а с другой стороны, шириной переходной области, которая, как было показано в работе [11], главным образом определяется толщиной подзатворного диэлектрика (которая определяет электрическую емкость транзистора) и толщиной слоя канала, в котором протекает ток, а также, возможно, другими параметрами транзистора. В данной работе с помощью простой численной одномерной стационарной модели впервые показана возможность пространственно-локализованного фотоэффекта в канале фототранзистора, пространственное положение которого может изменяться напряжением на затворе. Рассчитаны зависимости отношения фототока к темновому току от напряжения на затворе V_G для различных профилей пространственного распределения интенсивности падающего излучения, и показано, что данные зависимости воспроизводят с высокой степенью точности профили падающего излучения.

2. Модель фототранзистора. В данной работе используется модель, основанная на системе нелинейных дифференциальных уравнений, которая решается численно после замены производных конечными разностями. Модель является одномерной и стационарной, неизвестные функции зависят только от одной координаты x, направленной вдоль канала транзистора от истока к стоку (рис. 1a). Аналогичная модель использовалась для описания монослойного униполярного органического фототранзистора [12]. В данной работе модель была расширена путем добавления более подробного описания процесса генерации носителей заряда при поглощении фотонов, а также путем учета неравномерного распределения интенсивности падающего излучения вдоль оси x. В качестве активного слоя фототранзистора рассматривается слой с объемным гетеропереходом, состоящий из взаимопроникающих фаз донорного и акцепторного органических полупроводников, который в модели рассматривается как один эффективный полупроводник. Генерация носителей заряда здесь рассматривается как следующий многоступенчатый процесс (рис. 1b). При поглощении фотона образуется экситон, который в результате диффузии достигает гетероперехода, где образуется связанная электронно-дырочная пара (с электроном на акцепторе и дыркой на доноре, также называемая состоянием с переносом заряда), которая может либо диссоциировать на свободные носители под действием электрического поля E, либо релаксировать к основному состоянию с некоторой вероятностью в единицу времени k_f; кроме того, связанные электронно-дырочные пары на гетеропереходе образуются при рекомбинации свободных электронов и дырок. В данной работе для простоты считается, что морфология объемного гетероперехода является идеальной, то есть такой, что все экситоны достигают гетероперехода и преобразуются в связанные электрон-дырочные пары с вероятностью 1. Вероятность в единицу времени диссоциации связанных электронно-дырочных пар k_{diss} определяется формулой, которая использовалась в модели органических фотоэлементов с объемным гетеропереходом [13]. Подробное описание модели см. в дополнительном материале. Темп генерации связанных электронно-дырочных пар $G(x)$ равен количеству поглощенных фотонов в единице объема активного слоя в единицу времени, так как вероятность преобразования поглощенного фотона в связанную электронно-дырочную пару в модели принимается равной единице, поэтому рас-

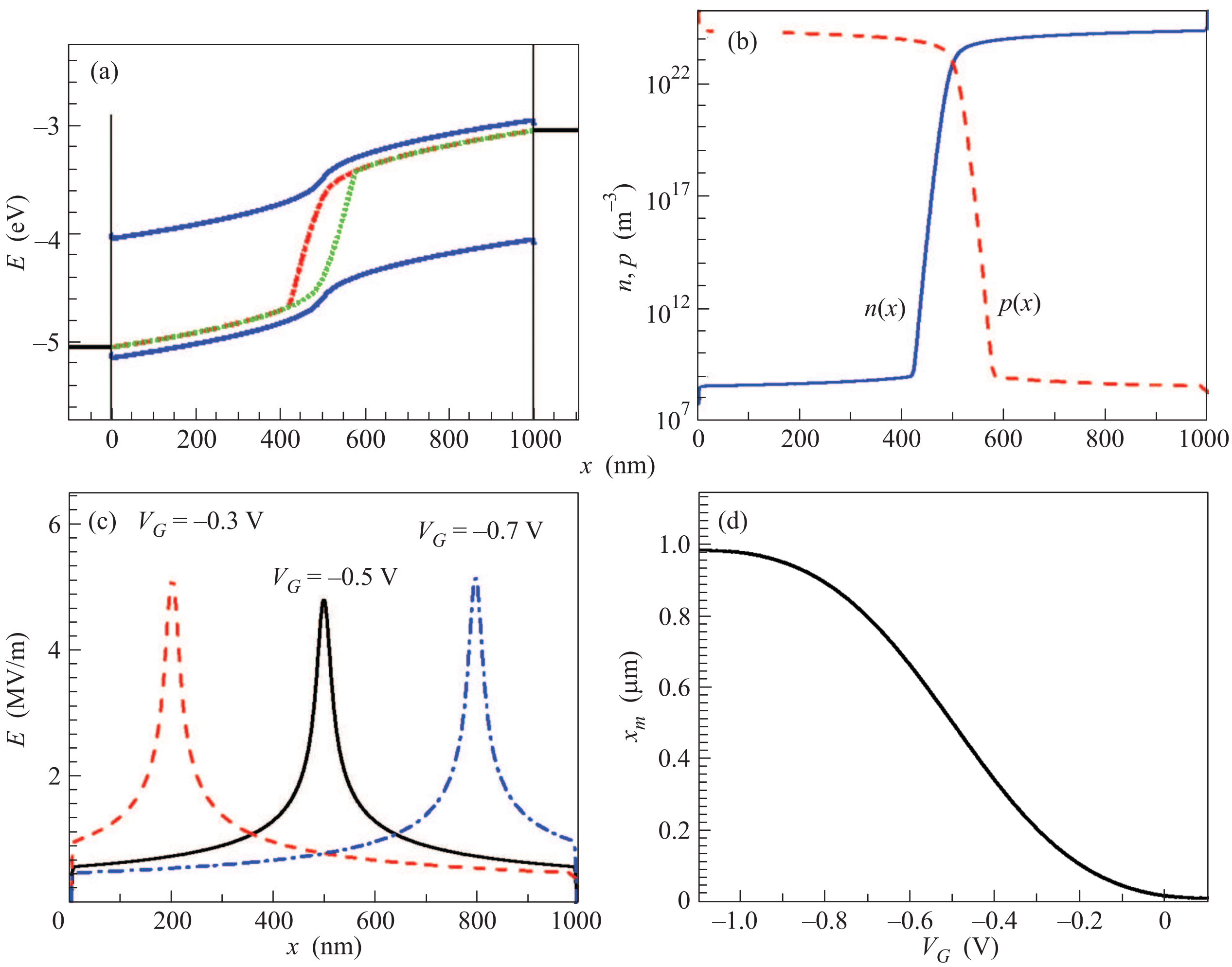

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Энергетическая зонная диаграмма. (b) – Распределение концентраций электронов и дырок n и p в канале транзистора. (c) – Распределение напряженности электрического поля при различных напряжениях V_G. (d) – Зависимость координаты максимума напряженности поля x_m от напряжения V_G. На энергетической зонной диаграмме (a) сплошные синие кривые обозначают верхний край валентной зоны (снизу) и нижний край зоны проводимости (сверху), штрихпунктирная красная линия обозначает квазиуровень Ферми для электронов, пунктирная зеленая линия обозначает квазиуровень Ферми для дырок, горизонтальные сплошные черные линии обозначают уровни Ферми в металлических электродах стока и истока, вертикальные черные сплошные линии обозначают границы между активным слоем и электродами. Все кривые получены при $V_D = -2$ В, графики на (a) и (b) получены при $V_G = -0.5$ В

пределение $G(x)$ по форме совпадает с распределением интенсивности падающего излучения. В настоящей работе исследуется отклик фототранзистора на падающее излучение, интенсивность которого имеет различные формы распределения вдоль координаты x, а именно постоянное

$$G(x) = G_0 = \text{const}, \tag{1}$$

ступенчатое (x_0 – координата края ступени)

$$G(x) = \begin{cases} G_0, & x < x_0, \\ 0, & x \geq x_0, \end{cases} \tag{2}$$

прямоугольное шириной w_G (x_0 – координата центра)

$$G(x) = \begin{cases} G_0, & x_0 - w_G/2 < x < x_0 + w_G/2, \\ 0, & x \geq x_0 + w_G/2 \cup x \leq x_0 - w_G/2 \end{cases} \tag{3}$$

и гауссово с шириной w_G на половине высоты (x_0 – координата максимума)

$$G(x) = G_0 \exp\left[-4\ln 2\left(\frac{x - x_0}{w_G}\right)^2\right]. \tag{4}$$

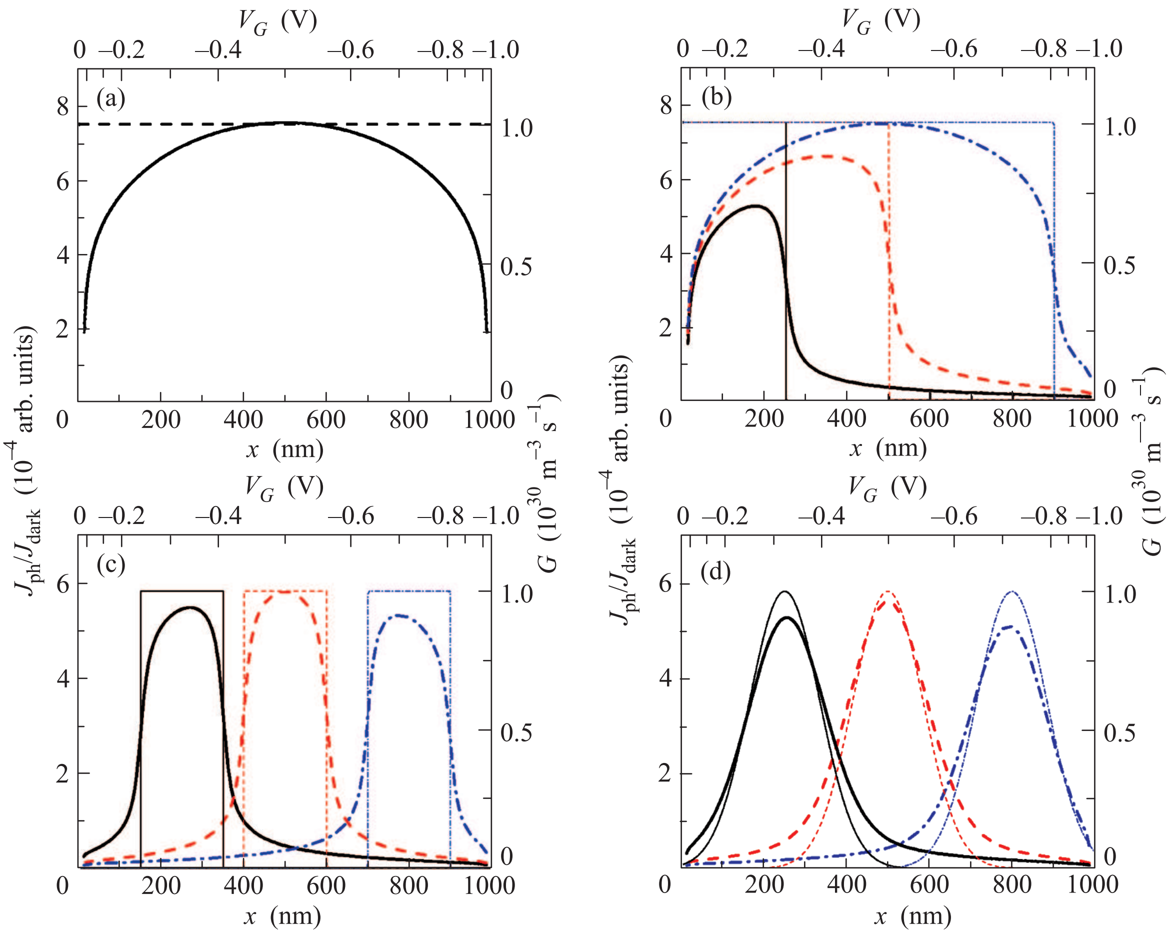

Рис. 3. (Цветной онлайн) Отклик фототранзистора (отношение фототока к темновому току в зависимости от напряжения на затворе V_G) (толстые линии) на различные распределения $G(x)$ (тонкие линии)

3. Распределение напряженности электрического поля в канале транзистора. Как было сказано выше, канал амбиполярного транзистора можно разделить на три области: область дырочной проводимости, где концентрация дырок велика, область электронной проводимости, где велика концентрация электронов, и переходная область между ними, которая обеднена носителями заряда и в которой напряженность электрического поля повышена. На рисунке 2a показана энергетическая зонная диаграмма канала фототранзистора при напряжении на стоке $V_D = -2$ В и напряжении на затворе $V_G = -0.5$ В, при таких напряжениях переходная область располагается строго в центре канала. Энергия электронов отсчитывается от вакуумного уровня в точке $x = 0$, положение нижнего края зоны проводимости E_c смещено вниз относительно вакуумного уровня на значение электронного сродства эффективного полупроводника, а положение верхнего края валентной зоны E_v смещено вниз относительно E_c на значение ширины запрещенной зоны. Изменение этих энергетических уровней с координатой x определяется электрическим потенциалом, который описывается уравнением Пуассона и определяется плотностью объемного заряда в активном слое и напряжением на затворе V_G. Положение квазиуровней Ферми для электронов и для дырок связано с концентрацией соответствующих носителей заряда. На рисунке 2b приведены распределения концентраций электронов и дырок в канале фототранзистора: при $x < 500$ нм в канале преобладают дырки, при $x > 500$ нм – электроны, а вблизи $x = 500$ нм суммарная концентрация свободных носителей заряда понижена, поэтому в данной области происходит наибольшее падение напряжения и напряженность электрического поля имеет максимум. На рисунке 2c показаны распределения напряженности электрического поля E в канале при различных напряжениях на затворе V_G. Видно, что это распределение имеет четко выраженный максимум, пространственное положение которого зависит от напряжения V_G. Координату максимума обозначим как x_m. На рисунке 2d приведена рассчитанная зависимость координаты x_m максимума напряженности электрического поля от V_G, данная зависимость является однозначной и монотонной, и с высокой степенью точности аппроксимируется функцией ошибок (интегралом от гауссовой функции).

4. Отклик фототранзистора на падающее излучение. Были рассчитаны передаточные характеристики фототранзистора в темноте и при освещении излучением с различным распределением интенсивности по x, описываемым формулами (1)–(4). Выходные и передаточные характеристики, а также зависимости фототока и отношения фототока к темновому току от напряжения V_G при освещении излучением, распределение интенсивности которого по x описывается формулой Гаусса, приведены в дополнительном материале. Фототок определяется как разность тока при освещении и темнового тока. Зависимости плотности фототока $J_{\rm ph}$ и ее отношения к плотности темнового тока $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G могут воспроизводить распределение интенсивности падающего света вдоль x, которая пропорциональна темпу фотогенерации $G(x)$. Чтобы это наглядно показать, были проведены расчеты зависимостей $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G для различных видов зависимостей $G(x)$, описываемых формулами (1)–(4). Диапазон напряжений V_G был выбран от -1.1 до 0.1 В, потому что из рис. 2d видно, что в данном диапазоне положение максимума электрического поля x_m проходит почти по всей длине канала от 0 до L. Для ступенчатой, прямоугольной и гауссовой зависимостей было выбрано по три различных распределения $G(x)$, отличающихся пространственным расположением, описываемым параметром x_0. Ширины пиков прямоугольных и гауссовых зависимостей w_G были выбраны равными 200 нм. На рисунке 3 толстыми линиями показаны рассчитанные зависимости $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G и тонкими линиями распределения $G(x)$, описываемые формулами (1)–(4), при этом шкала напряжений V_G преобразована таким образом, что каждому значению V_G соответствует значение на шкале x согласно зависимости $x_m(V_G)$, приведенной на рис. 2d. В случае освещения, однородного вдоль x, т.е. при $G(x)$ = const, зависимость $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G имеет максимум при напряжении, соответствующем амбиполярному режиму проводимости, что согласуется с данными эксперимента из литературы [7]. При этом отклик фототранзистора $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ слабо изменяется в диапазоне V_G, соответствующему середине канала (при x в диапазоне 300–700 нм) и снижается при V_G, соответствующим x_m вблизи контактов с электродами. В случае ступенчатой зависимости $G(x)$, определяемой формулой (2), пространственное положение края ступени воспроизводится на зависимости $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G. Для прямоугольной и гауссовой зависимостей $G(x)$, описываемых формулами (3)–(4), их пространственное расположение и ширина воспроизводятся с высокой точностью до нескольких десятков нм на зависимости $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G.

5. Фототранзисторы с большей длиной канала. Приведенные выше результаты были получены для транзистора с небольшой длиной канала 1 мкм и для падающего излучения с короткой длиной волны порядка 200 нм, это связано с тем, что при увеличении длины канала требуется большее время расчета. Тем не менее, были получены предварительные результаты для транзистора с длиной канала 10 мкм, на канал которого падает излучение, имеющее гауссово распределение интенсивности с шириной на полувысоте, равной 0.5 мкм, что вполне может быть достигнуто для видимого электромагнитного излучения. На рисунке 4 сплошная линия показывает рас-

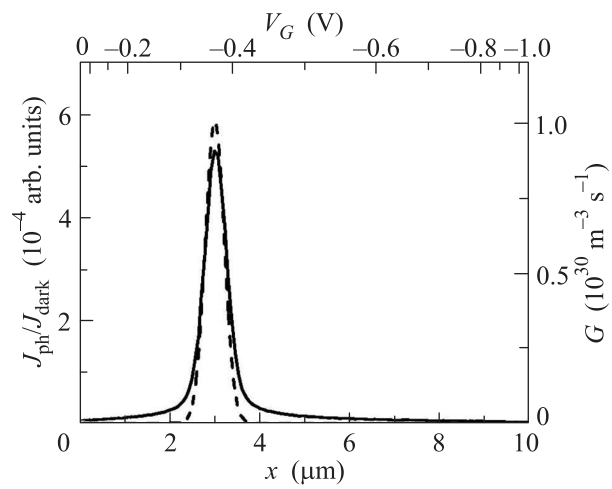

Рис. 4. Отклик фототранзистора с длиной канала 10 мкм (отношение фототока к темновому току в зависимости от напряжения на затворе V_G) (сплошная линия) на падающее излучение с гауссовым распределением интенсивности по x с центром при $x = 3$ мкм и шириной на полувысоте 0.5 мкм (штриховая линия)

считанную зависимость $J_{\rm ph}/J_{\rm dark}$ от V_G, а штриховая линия показывает распределение $G(x)$, при этом шкала напряжений V_G преобразована таким же образом, как и на рис. 3, но с использованием зависимости $x_m(V_G)$, рассчитанной для транзистора с длиной канала 10 мкм. Как видно, зависимость отношения фототока к темновому току от V_G хорошо воспроизводит распределение падающего излучения, а именно, пространственное положение и ширину пика, и в случае большей длины канала фототранзистора.

6. Заключение. Обнаруженный в данной работе пространственно-локализованный фотоэффект является нетривиальным и требует дальнейшего более детального исследования, в частности, поиска оптимальных параметров материалов и структуры фототранзистора, обеспечивающих как высокую энергетическую эффективность, так и пространственное разрешение.

Автор выражает благодарность Паращуку Дмитрию Юрьевичу за полезные обсуждения и рекомендации.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект # 18-79-00341).

---

1. K.-J. Baeg, M. Binda, D. Natali, M. Caironi, and Y.-Y. Noh, Adv. Mater. **25**, 4267 (2013).
2. P. Gu, Y. Yao, L. Feng, S. Niu, and H. Dong, Polym. Chem. **6**, 7933 (2015).
3. S. Dutta and K.S. Narayan, Adv. Mater. **16**, 2151 (2004).
4. T.P.I. Saragi, R. Pudzich, T. Fuhrmann, and J. Salbeck, Appl. Phys. Lett. **84**, 2334 (2004).
5. T.P.I. Saragi, K. Onken, I. Suske, T. Fuhrmann-Lieker, and J. Salbeck, Opt. Mater. **29**, 1332 (2007).
6. S. Nam, H. Han, J. Seo, M. Song, H. Kim, T.D. Anthopoulos, I. McCulloch, D.D.C. Bradley, and Y. Kim, Adv. Electron. Mater. **2**, 1600264 (2016).
7. H. Kim, G. Kim, I. Song, J. Lee, H. Abdullah, C. Yang, and J.H. Oh, RSC Adv. **8**, 14747 (2018).
8. А.Н. Алешин, И.П. Щербаков, Ф.С. Федичкин, ФТТ **54**, 1586 (2012).
9. Y.-Y. Noh, D.-Y. Kim, Y. Yoshida, K. Yase, B.-J. Jung, E. Lim, and H.-K. Shim, Appl. Phys. Lett. **86**, 043501 (2005).
10. M.Y. Cho, S.J. Kim, Y.D. Han, D.H. Park, K.H. Kim, D.H. Choi, and J. Joo, Adv. Funct. Mater. **18**, 2905 (2008).
11. M. Kemerink, D.S.H. Charrier, E.C.P. Smits, S.G.J. Mathijssen, D.M. de Leeuw, and R.A.J. Janssen, Appl. Phys. Lett. **93**, 033312 (2008).
12. V.A. Trukhanov, D.S. Anisimov, V.V. Bruevich, E.V. Agina, O.V. Borshchev, S. Ponomarenko, J. Zhang, A.A. Bakulin, and D.Yu. Paraschuk, Proc. of SPIE **9942**, 994210 (2016).
13. L.J.A. Koster, E.C.P. Smits, V.D. Mihailetchi, and P.W.M. Blom, Phys. Rev. B **72**, 085205 (2005).