

НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДНОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ОРГАНИЧЕСКОМ ФОТОДИОДЕ

С. В. Яблонский^{}, В. В. Боднарчук^{**}, С. Г. Юдин*

*Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук
11933, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 15 августа 2019 г.,
после переработки 15 августа 2019 г.
Принята к публикации 15 августа 2019 г.

С помощью нелинейной резисторно-емкостной модели объясняется одна из возможных причин деградации органических фотодиодов. В качестве нелинейных элементов в эквивалентной схеме используются электронные ключи для коммутации параметров фотодиода при включении и выключении света. Модель рассматривает фотодиод как пространственно-локализованный генератор фотонапряжения, нагруженный на пассивный четырехполюсник, соединенный с электродами через пассивные интерфейсные слои. Именно наличие пассивных слоев, имеющих участки с разнонаправленными встроенными тянущими полями является основной причиной деградации характеристик фотодиода. Предложенная эквивалентная схема хорошо воспроизводит экспериментальные переходные и стационарные процессы в органических фотодиодах и может быть полезна как для измерения электрических параметров фотодиодов, так и для изучения процессов, приводящих к их деградации.

DOI: 10.31857/S0044451020030141

Концепция объемного гетероперехода в донорно-акцепторных органических материалах, тесно связанная с явлением сверхбыстрого перехода фотоэлектрона с образованием СТ (charge transfer) экситонов [1], помогла существенно повысить эффективность преобразования света в органических солнечных батареях. В настоящее время имеется ряд примеров органических солнечных батарей на основе объемных гетеропереходов, на которых достигнуты сертифицированные эффективности преобразования света более 10 % [2–4], а в работах [5, 6] были зафиксированы рекордные эффективности, соответственно 14.2 % и 15 %. Однако временная стабильность таких элементов оказалась совершенно недостаточной для их практического использования. Так, например, вольт-амперные характеристики органических солнечных батарей существенно деградируют после непродолжительной засветки имитатором солнечного излучения. Хорошим ре-

зультатом является уменьшение эффективности на 20 % после засветки в течение 2000 мин на имитаторе солнечного излучения АМ 1.5G (100 Вт/см²). Различными способами удается замедлить процесс деградации, но коммерчески рентабельный ресурс работы 5000 ч при эффективности более 10 % остается пока недостижимым [7]. Таким образом, именно плохая временная стабильность является узким местом на пути внедрения органических материалов в качестве активных элементов солнечных батарей или фотодетекторов.

Выше речь шла о деградации величины стационарного фотоэлектрического тока постоянной амплитуды в условиях постоянного во времени светового потока. В случае же модулированного светового излучения для генерации переменного фототока ситуация оказалась намного лучше, так как органический фотопреобразователь в этом случае оставался работоспособным в течение многих месяцев, хотя и терял способность вырабатывать постоянный ток [8, 9]. Интересно, что данная особенность являлась и является источником многочисленных недоразумений при использовании модуляционного метода для измерения внешней квантовой эффективности

^{*} E-mail: yablonskii2005@yandex.ru

^{**} E-mail: bondarchuk_viktoriya@mail.ru

[10]. В этом случае величина постоянного стационарного тока, измеренного с помощью электрометрического усилителя при освещении образца светом постоянной интенсивности (AM1.5G), зачастую не совпадала с величиной тока, полученной из вычисления свертки внешней квантовой эффективности, измеренной модуляционным методом, со спектром имитатора [11]. Причиной такого расхождения, как будет показано ниже, является формирование пассивных интерфейсных слоев со значительными переходными емкостями и сопротивлениями, работающими как высокочастотные RC-фильтры. Именно переходные емкости достаточно больших номиналов ответственны за протекание токов смещения, регистрируемых в нагрузочном сопротивлении или в преобразователе ток–напряжение. Здесь в качестве так называемой «химической» емкости C выступает интерфейсный слой вблизи электродов с большой концентрацией центров рекомбинации [12]. Этот же слой в общепринятой модели Шокли–Рида–Холла [13] имеет высокую скорость рекомбинации носителей заряда, что приводит к росту последовательного сопротивления R , которое совместно с емкостью C в предельном случае блокирует сквозной постоянный фототок через слой органического полупроводника.

Обсуждаемая ниже модель существенным образом опирается на факт существования вблизи электродов интерфейсных слоев с нулевыми значениями встроенного потенциала. Пассивные слои не участвуют в генерации фотоэлектрического тока, но существенным образом влияют на его величину и динамические характеристики фотодиода. Генерация фототока происходит лишь в оставшейся активной пространственно-локализованной области. О пространственно-локализованном фотоэффекте в несколько другом аспекте высказались авторы работы [14].

В данной работе исследуется переходный фотогальванический эффект в фотодиодах на основе различных органических соединений. Предложенная динамическая нелинейная резисторно-емкостная модель с хорошей точностью описывает переходные процессы в фотодиодах и их амплитудно-частотные характеристики. С помощью модели вычисляются электрические параметры органических фотодиодов по электрическому отклику на однократный прямоугольный импульс света, что позволяет также исследовать процессы деградации и акцентирует внимание на их причины. Объясняются также систематические, имеющие принципиальный характер, расхождения результатов моделирования с экспериментальными данными.

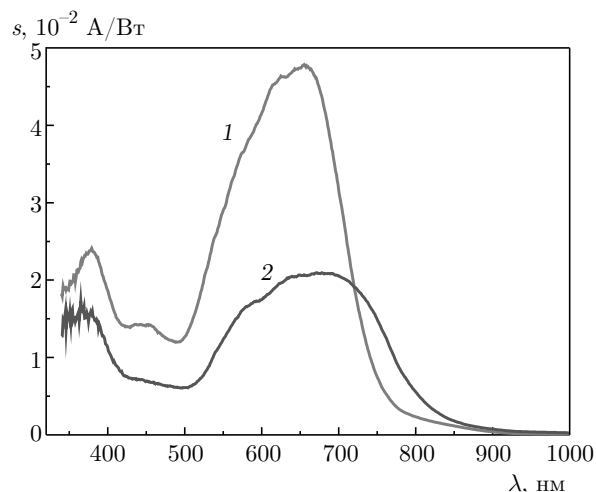


Рис. 1. Ампер-ваттная чувствительность фотодиода на основе ZnPc/C₆₀, полученная модуляционным методом. Частота прерываний обтюратора 80 Гц. Масса ZnPc 3.05 мг, C₆₀ 1.05 мг. Кривая 1 — свежеприготовленный образец; 2 — тот же образец, но через 12 ч

Все исследованные образцы на основе низкомолекулярных органических соединений приготавливались с помощью стандартных технологических приемов [15–17], заключающихся в соответствующей очистке поверхностей подложки, покрытой токопроводящим электродом ИТО из смеси оксидов индия и олова, вакуумного ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) напыления компонентов активного слоя, а также последующего напыления алюминиевого электрода. Параметры образца на основе классической композиции фталоцианина цинка (ZnPc) и фуллерена (C₆₀) следующие: $l_{ITO} = 100$ нм, $l_{ZnPc/C_{60}} = 100$ нм, $l_{Al} = 50$ нм, $S = 4 \cdot 5$ мм², где l и S — соответственно толщины слоев и площадь под электродом. Толщина и соотношение донорно-акцепторной оптимальной композиции подбирались опытным путем. Образцы органических фотодиодов облучались прямоугольными импульсами света от GaAs-светодиодов (длина волны $\lambda = 660, 440, 940$ нм). Импульсы фототока, генерируемые фотодиодами, регистрировались цифровым осциллографом на основе компьютерной программы PhysLab и электронного модуля Z-Lab, состоящего из предусилителя с высоким входным сопротивлением 1 МОм и аналого-цифрового преобразователя. В качестве нагрузки использовали сопротивление $R = 91$ кОм.

На рис. 1 показаны спектральные зависимости ампер-ваттной чувствительности, полученные стандартным модуляционным методом путем прерывания пучка света обтюратором с последующим detec-

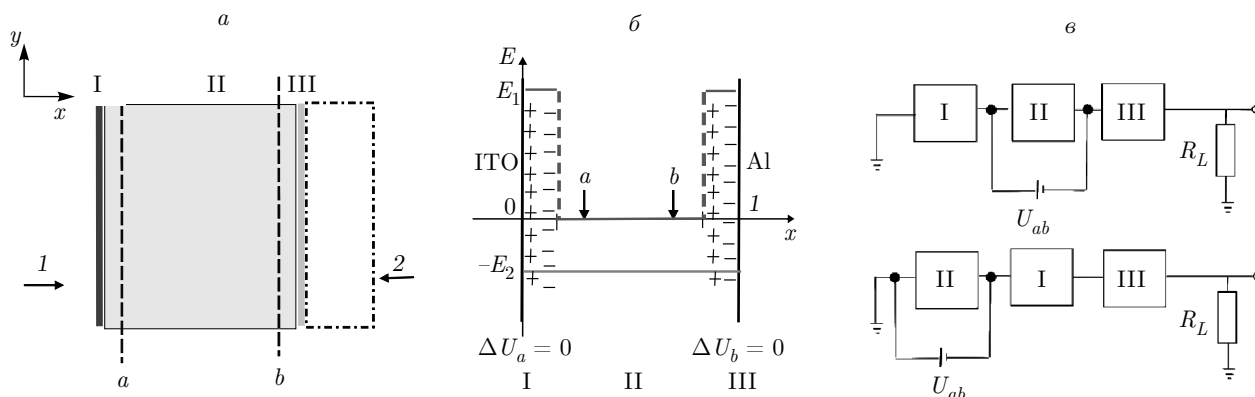


Рис. 2. а) Структура фотодиода: I, III — пассивные интерфейсные слои; II — активная область ячейки с встроенным потенциалом U_{ab} ; 1 — тонкий слой алюминия, $l_{Al} = 50$ нм; 2 — стеклянная подложка с проводящим слоем ИТО, $l_{ITO} = 100$ нм; $l_{ZnPC/C60} = 100$ нм; $S = 4 \times 5$ мм². б) Распределение электрического поля E_1 от двух двойных слоев (синяя линия) и встроенного поля E_2 контактной разности потенциалов (красная линия). в) Эквивалентные блок-схемы фотодиода с нагрузочным сопротивлением $R_L = 83.4$ кОм с учетом входного сопротивления предусилителя

тированием синхронным детектором. Кривая 1 соответствует свежеприготовленному образцу, а кривая 2 — деградированному. В максимуме спектральной чувствительности деградированный образец теряет чуть больше 50 %, оставаясь работоспособным в модуляционном режиме в течение многих месяцев, в то время как измерение внешней эффективности этого же образца на постоянном токе показывает нулевую чувствительность во всем спектральном интервале.

Рисунок 2 иллюстрирует главные моменты, лежащие в основе переходного процесса реального органического фотодиода. На рис. 2а показан фотодиод, состоящий из активной части II и двух пассивных интерфейсов, I и III. Пассивный интерфейсный слой состоит из двух участков органического материала, в которых встроенные поля разнонаправлены. При освещении фотодиода эти участки ведут себя как «неосвещенные», т. е. пассивные. В пассивных интерфейсных слоях I и III с условными границами a и b соответственно от электродов из ИТО и Al имеем

$$\Delta U_a = \Delta U_b = \int_0^a E_{in} dx = \int_b^l E_{in} dx = 0,$$

где E_{in} — встроенное поле в пределах интерфейсного слоя, l — толщина слоя. В активной области II встроенный потенциал $U_{ab} = \int E_{in}(x) dx \neq 0$. Здесь E_{in} — внутреннее поле внутри области II.

Устройство активной и пассивной частей фотодиода показано на рис. 2б. Этот рисунок иллюстрирует встроенное поле E_2 , создающее контактную разность потенциала, и поле E_1 , формирующееся

двойными слоями вблизи электродов. Такие двойные слои могут быть сформированы как гомо-, так и гетерозарядами. Поля E_1 и E_2 направлены в разные стороны, причем $|E_1| > |E_2|$. В точках a и b

$$\begin{aligned} \Delta U_a = \Delta U_b &= \int_0^a [E_1(x) + E_2(x)] dx = \\ &= \int_b^l [E_1(x) + E_2(x)] dx = 0. \end{aligned}$$

На рис. 2в показаны блок-схемы фотодиодов, а на рис. 3а и 3б — эквивалентные схемы для случаев соответственно распределенных и сосредоточенных параметров. Мы использовали в качестве активного элемента генератор напряжения. Сделано это было намерено, поскольку такой подход удобен для описания как поляризационных эффектов в органических материалах, так и результатов исследования образцов методами диэлектрической спектроскопии. Простая модификация схемы на рис. 3б позволяет исследовать релаксационные явления с помощью абсолютно идентичной схемы с использованием генератора тока, как это показано на рис. 3в. Для численного совпадения с переходной характеристикой, описываемой схемой на рис. 3б, амплитуда генератора постоянного тока выбиралась равной $I_{ab} = 0.97$ мкА при мощности GaAg-светодиода $P = 15$ мВт, $\lambda = 660$ нм.

На рис. 4 показан пример классического отклика фотодиода на воздействие прямоугольного импульса излучения. В данном случае мы использовали в качестве активной среды широко известную модельную композицию фталоцианина цинка (ZnPC)

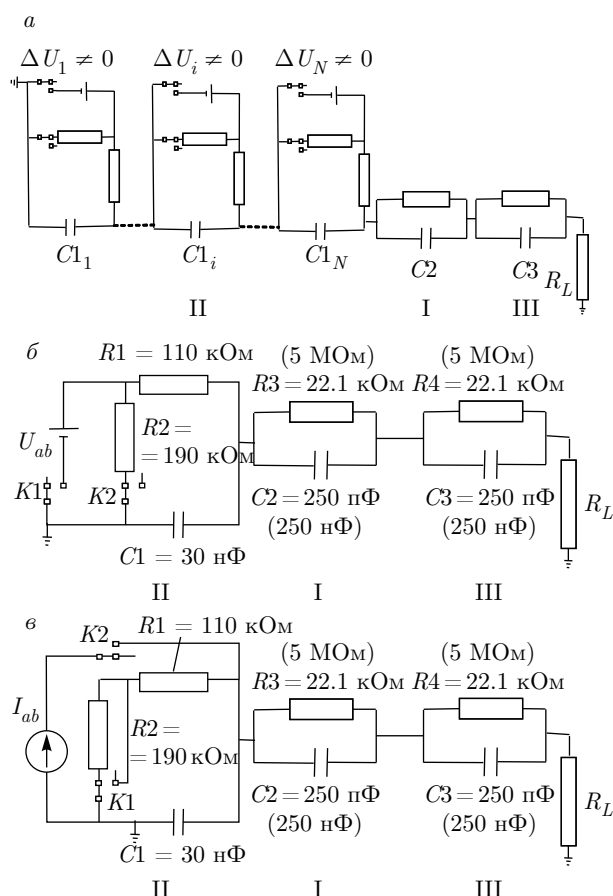


Рис. 3. а) Эквивалентная схема переходного процесса в фотодиоде с распределенными параметрами. В качестве активного элемента использовали генератор фотонапряжения. б) Эквивалентная электрическая схема фотодиода с сосредоточенными параметрами, соответствующими свежеприготовленному образцу. Активный элемент — источник напряжения с амплитудой, равной встроенному потенциалу. Цифры в скобках относятся к этому же образцу, но выдержанному в атмосферных условиях при комнатной температуре в течение 12 ч. К1 и К2 — электронные ключи, замыкающий (К1) и размыкающий (К2) электрическую цепь в момент прихода переднего фронта прямоугольного импульса света и действующие в обратном порядке после прихода заднего фронта. в) Эквивалентная электрическая схема переходного процесса фотодиода при использовании генератора постоянного тока

с фуллереном (C_{60}). Эквивалентной электрической схемой процесса, изображенного на рис. 4, является интегрирующая цепочка с двумя нелинейными элементами — электронными ключами, управляемыми источником напряжения, и величиной RC в условиях засветки и в темноте. Эквивалентная схема данного процесса показана на рис. 3б для случая свежеприготовленного образца.

На рис. 5 изображен отклик на прямоугольный световой импульс для того же образца после вы-

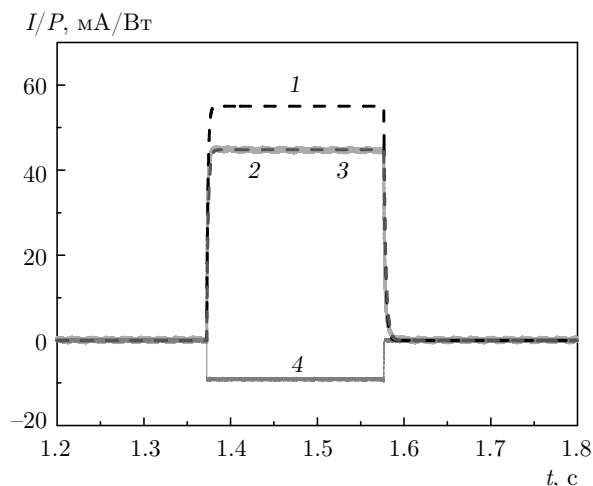


Рис. 4. Фотоэлектрический отклик на прямоугольный световой импульс (кривая 4, $\lambda = 660$ нм). Теоретическая кривая 1 для случая, когда $R3 = R4 = 0$. Экспериментальная кривая 2 (зеленая сплошная) с хорошей точностью совпадает с теоретической кривой 3 (синяя штриховая линия), для последовательных сопротивлений $R3 = R4 = 22.1$ кОм

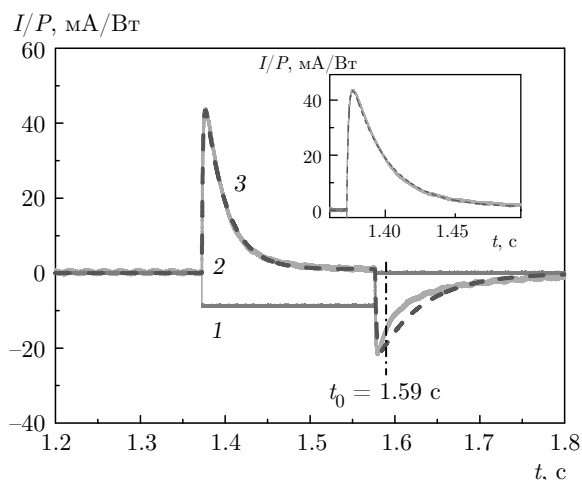


Рис. 5. Фотоэлектрический отклик на прямоугольный световой импульс (кривая 1, $\lambda = 660$ нм). Теоретическая кривая 3 (синяя штриховая) для случая, когда последовательные сопротивления обоих интерфейсов равны $R3 = R4 = 5$ МОм, а переходные емкости $C2 = C3 = 250$ нФ. Экспериментальная кривая 2 (зеленая сплошная) с хорошей точностью совпадает с теоретической кривой 3, что иллюстрируется увеличенными участками кривых на вставке. При $t > 1.59$ с теоретическая кривая аппроксимируется экспоненциальной функцией с временной константой $t_1 = 53$ мс, а экспериментальная кривая — суммой трех экспонент с константами $t_1 = 13$ мс, $t_2 = 47$ мс, $t_3 = 167$ мс

держки в течение 12 ч при нормальных атмосферных условиях. Различие в этих двух крайних ситуациях заключалось в катастрофическом росте (на несколько порядков) переходных емкостей и сопротивлений для деградированного образца — $C2$, $C3$ и $R3$, $R4$ в обозначениях эквивалентной схемы на рис. 3б. Важным моментом в определении электрических параметров эквивалентной схемы являлся процесс аппроксимации экспериментальных релаксационных кривых, заключающийся в поиске максимально приближенной теоретической кривой по критерию минимальности остаточного члена или разности между значениями экспериментальной и теоретической кривых (аналог остаточного члена в ряду Тэйлора).

Для поиска оптимальной теоретической кривой мы воспользовались возможностями программы Electronics Workbench (EWB) для анализа переходных процессов в электрических аналоговых схемах. Процесс аппроксимации экспериментальных кривых на рис. 4 и 5 состоял из двух этапов. Сначала аппроксимировалась кривая фотоэлектрического отклика для деградированного образца. Практически требовалось последовательно варьировать порядка 10–15 комбинаций электрических параметров эквивалентной схемы на рис. 3б, чтобы добиться приемлемого совпадения. Так, в качестве примера на вставке к рис. 5 показаны в увеличенном масштабе участки теоретической и экспериментальной кривых для деградированного образца. Для начального участка кривой переходного процесса в режиме засветки всегда удавалось получить почти идеальное совпадение экспериментальной и теоретической кривых, как это видно на рис. 5. Кривая аппроксимировалась с помощью эквивалентной схемы, приведенной на рис. 3б, в приближении одинаковых электрических характеристик интерфейсов. В результате аппроксимации вычисленный встроенный потенциал оказался равен $U_{ab} = 107.2$ мВ. Для деградированного образца получили $R3 = R4 = 5$ МОм и $C2 = C3 = 250$ нФ. Знание величины «химической» емкости пассивной интерфейсной области позволяет сделать оценку по порядку величины концентрации n ловушек: для $l = 0.1L$, где l — ширина интерфейсного слоя, L — толщина образца, $U = 0.1$ В имеем $n = UC/eV_0 = 10^{18}$ см $^{-3}$. Здесь e — заряд электрона, V_0 — объем образца, $V_0 = SL$, $S = 4 \cdot 5$ мм 2 , $L = 100$ нм, $C = 250$ нФ.

Существенное расхождение между модельной кривой и экспериментальной систематически проявлялось при выключении света, как это хорошо вид-

но на рис. 5 при $t > 1.59$ с. Аналогичные особенности переходных процессов при выключении света наблюдали также и в других донорно-акцепторных системах, таких как CuPc/C $_{60(70)}$, FePc/C $_{60}$, CoPc/C $_{60}$, включая фотодиоды Шоттки на основе фталоцианинов металлов в контакте с электродом из алюминия. Причину такого поведения можно понять если аппроксимировать темновую релаксацию суммой экспоненциальных функций. Было найдено, что теоретическая кривая идеально описывается мо-
ноэкспоненциальной функцией

$$y = y_0 + A_1 \exp[(t - t_0)/t_1],$$

в то время как экспериментальная кривая требует привлечения по крайней мере трех экспонент. Для теоретической кривой при релаксации получили $t_1 = 53$ мс, а для экспериментальной кривой — $t_1 = 13$ мс, $t_2 = 47$ мс, $t_3 = 167$ мс. Такое поведение в работе [18] объясняется релаксацией третьей поляризации в слабопроводящем диэлектрике вследствие независимых процессов, включающих максвелловскую релаксацию, а также термическое освобождение зарядов из мелких и глубоких ловушек, имеющих разные времена жизни.

Таким образом, процесс релаксации заряда в органическом фотодиоде при отключении источника излучения является более сложным процессом, имеющим особенности, не учитываемые предлагаемой моделью и, следовательно, не может быть адекватно описан в ее рамках. Времена t_1 , t_2 и t_3 — это времена жизни соответственно носителя заряда в мелкой ловушке, максвелловское время и время жизни в глубокой ловушке. О двух типах ловушек известно также из работы [19].

Экспериментальная кривая 2 на представленном выше рис. 4 для свежеприготовленного образца аппроксимировалась теоретической кривой 3 с помощью эквивалентной схемы фотодиода, приведенной на рис. 3б, с известными величинами U_{ab} , $C1$, $R1$ и $R2$, но неизвестными параметрами интерфейсных слоев. С помощью программы EWB подбирались соответствующие переходные сопротивления, в данном случае $R3 = R4 = 22.1$ кОм. Кривая 1 на рис. 4 соответствует идеальному варианту, при котором последовательные сопротивления равны нулю.

Интересен случай с разными электрическими характеристиками интерфейсов. В этом случае формируется двухслойный диэлектрик Максвелла–Вагнера. Такая структура, как известно, проявляет «аномальную» низкочастотную дисперсию в диэлектрическом спектре [20]. Так, например, если

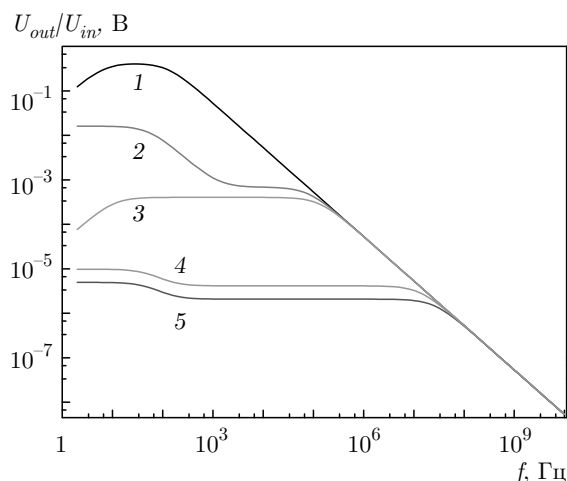


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики схемы, изображенной на рис. 3б, полученные с помощью программы EWB при $R_1 = 110 \text{ кОм}$, $R_2 = 190 \text{ кОм}$, $C_1 = 30 \text{ нФ}$, $R_3 = R_4 = 5 \text{ МОм}$. Вместо источника постоянного напряжения к схеме подключается генератор синусоидальных колебаний с входной амплитудой $U_{in} = 1 \text{ В}$: кривая 1 — $C_2 = 250 \text{ нФ}$, $C_3 = 250 \text{ нФ}$, $R_L = 83.6 \text{ кОм}$; 2 — $C_2 = 250 \text{ пФ}$, $C_3 = 250 \text{ нФ}$, $R_L = 83.6 \text{ кОм}$; 3 — $C_2 = 250 \text{ нФ}$, $C_3 = 250 \text{ нФ}$, $R_L = 50 \text{ Ом}$; 4 — $C_2 = 250 \text{ пФ}$, $C_3 = 250 \text{ нФ}$, $R_L = 50 \text{ Ом}$; 5 — $C_2 = 250 \text{ пФ}$, $C_3 = 250 \text{ пФ}$, $R_L = 50 \text{ Ом}$

построить теоретические амплитудно-частотные характеристики фотодиода, то при определенных параметрах эквивалентной схемы на характеристике фотодиода в диэлектрическом спектре появляются особенности, отражающие низкочастотные релаксационные процессы, как это имеет место в ситуации, изображенной на рис. 6 (кривые 2, 4, 5). Эффект низкочастотной дисперсии экспериментально наблюдали авторы работы [21] при исследовании диэлектрических свойств органических фотодиодов на основе объемного гетероперехода.

На рис. 6 амплитуды кривых 3 и 4 отличаются приблизительно в 46 раз. По-видимому, именно такая ситуация имеет место в работе [9], когда амплитуда переходного тока возрастала в 50 раз после нанесения тонкого слоя диэлектрика на один из электродов. В большинстве случаев, как это следует также из нашего собственного опыта, нанесение пассивирующего слоя приводит лишь к незначительному изменению амплитуды переходного тока, как это имеет место для случаев кривых 4 и 5 на рис. 6.

В заключение отметим, что проведенный анализ показал, что предложенная нелинейная резисторно-емкостная электрическая модель в некоторых случаях адекватно описывает переходные процессы в органических фотодиодах. С помощью аппрокси-

мации экспериментальной кривой переходного тока вычисляются параметры фотодиода включая величины встроенного потенциала и амплитуды генератора фототока. Показано, что с помощью исследования эволюции переходного тока можно изучать процессы деградации характеристик фотодиода. Неоднородное распределение гомо- и гетерозарядов в интерфейсных областях, приводящее к инверсии знака встроенного поля, по нашему мнению, является одной из основных причин деградации характеристик органических фотодиодов [19, 22].

Следует подчеркнуть, что положительным моментом в появлении пассивных интерфейсных слоев является возможность детектирования переменных сигналов высокой частоты. Уступая неорганическим фотодиодам в детектировании в видимом диапазоне длин волн, органические фотодиоды могли бы составить им успешную конкуренцию в ультрафиолетовом участке спектра. Немаловажным моментом является также большое время жизни органических фотодиодов, работающих в режиме генерации переменного тока.

Предложенный подход к исследованию переходных токов, по-видимому, пригоден не только для исследования фотоэлектрических явлений в органических полупроводниках. Похожие процессы имеют место в сегнетоэлектрических неорганических кристаллах [23, 24], а также в полимерных материалах [25, 26].

Хотя в настоящее время и не существует универсального метода для исследования параметров ловушек [27], тем не менее становится совершенно ясно, что осмысленная борьба с процессами деградации в органических полупроводниках требует более ясного понимания природы ловушек, а также центров рекомбинации, т.е. конкретного физического устройства ловушек на атомно-молекулярном уровне.

Идея интерфейсных слоев оказалась плодотворной для построения не только электрических эквивалентных схем на базе пассивных двухполюсников. Рассмотрение интерфейсных слоев с внутренними источниками энергии позволило также объяснить anomalous поведение переходного тока [28] в органических фотодиодах, о чем будет сообщено в последующих работах.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Благодарности. Авторы выражают благодарность В. Э. Шубину за полезные обсуждения результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Huang, E. J. Kramer, A. J. Heeger, and G. C. Bazan, *Chem. Rev.* **114**, 7006 (2014).
2. W. Zhao, D. Qian, S. Zhang, S. Li, O. Inganäs, F. Gao, and J. Hou, *Adv. Mater.* **28**, 4734 (2016).
3. S. Zhang, L. Ye, and J. Hou, *Adv. Energy Mater.* **6**, 1502529 (2016).
4. Q. Wan, X. Guo, Z. Wang, W. Li, B. Guo, W. Ma, and Y. Li, *Adv. Funct. Mater.* **26**, 6635 (2016).
5. S. Li, L. Ye, W. Zhao, H. Yan, B. Yang, D. Liu, and J. Hou, *J. Amer. Chem. Soc.* **140**, 7159 (2018).
6. J. Yuan, Yu. Zhang, L. Zhou, J. Ulanski, Yo. Li, and Y. Zou, *Joule* **3**, 17 (2019), doi:10.1016/j.joule.2019.01.004.
7. F. Ali, A. Sharma, J. P. Tiwari, and S. Chand, *AIP Adv.* **5**, 027108 (2015).
8. X. Hu, L. Iwasaki, A. Suizu, R. Yoshikawa, H. Awaga, and K. Ito, *Chem. Phys. Lett.* **484**, 177 (2010).
9. S. Dalglish, M. M. Matsushita, L. Hu, B. Li, H. Yoshikawa, and K. Awaga, *J. Amer. Chem. Soc.* **134**, 12742 (2012).
10. P. Peumans and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 126 (2001).
11. P. Peumans and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 338 (2002).
12. L. Xu, Y.-J. Lee, and J. W. P. Hsu, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 123904 (2014).
13. L. Tzabari and N. Tessler, *J. Appl. Phys.* **109**, 064501 (2011).
14. В. А. Труханов, *Письма в ЖЭТФ* **109**, 815 (2019).
15. N. V. Usol'tseva, A. I. Smirnova, A. V. Kazak, N. I. Giricheva, N. E. Galanin, G. P. Shaposhnikov, V. V. Bodnarchuk, and S. V. Yablonskii, *Opto-Electr. Rev.* **25**, 127 (2017).
16. А. В. Казак, Н. В. Усольцева, А. И. Смирнова, В. В. Боднарчук, С. Н. Сульянов, С. В. Яблонский, *Кристаллография* **61**(3), 462 (2016).
17. Н. В. Усольцева, А. И. Смирнова, А. В. Казак, М. И. Ковалева, Н. Е. Галанин, Г. П. Шапошников, В. В. Боднарчук, С. В. Яблонский, *Жидк. крист. и их практич. использ.* **15**(4), 56 (2015).
18. А. А. Барыбин, В. И. Шаповалов, *ФТТ* **50**, 781 (2008).
19. K. Kawano and C. Adachi, *Adv. Funct. Mater.* **19**, 3934 (2009).
20. А. Р. Хиппель, *Диэлектрики и волны*, Изд-во иностр. лит., Москва (1960).
21. С. П. Палто, А. В. Алпатова, А. Р. Гейвандов, Л. М. Блинов, В. В. Лазарев, С. Г. Юдин, *Опт. и спектр.* **124**, 210 (2018).
22. B. Chen, X. Qiao, C.-M. Liu, C. Zhao, H.-C. Chen, K.-H. Wei, and B. Hu, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 193302 (2013).
23. W. Känzig, *Phys. Rev.* **98**, 549 (1955).
24. П. В. Ионов, *ФТТ* **15**, 2827 (1973).
25. T. Mizutani, Y. Takai, and M. Ieda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **12**, 1553 (1973).
26. K. Tahira and K. C. Kao, *J. Phys. D* **18**, 2247 (1985).
27. М. Поуп, Ч. Свеберг, *Электронные процессы в органических кристаллах*, т. 2, Мир, Москва (1985).
28. A. Kumar, S. Goel, and D. S. Misra, *Phys. Rev. B* **35**, 5635 (1987).