

УДК 621.315.592

*А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ\*\*\*, С.Н. НЕСМЕЛОВ\**

### РАСЧЕТ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРОВОДЯЩИХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Представлены результаты расчета пороговых характеристик фотопроводящих детекторов на основе органических полупроводников с учетом специфики их кинетических и рекомбинационных свойств.

**Ключевые слова:** органические полупроводники, фоторезистор, пороговая мощность, обнаружительная способность, шумы.

В настоящее время выполнен весьма значительный объем исследовательских работ по созданию органических светоизлучающих диодов, солнечных элементов и транзисторов, но органические фотодетекторы до сих пор привлекали значительно меньше внимания исследователей. Органические фотодетекторы качественно сходны с органическими солнечными элементами, но критерии оценки их характеристик существенно различаются. Материальные системы и геометрии приборов могут хорошо подходить для солнечных элементов, но приведут к недостаточно пригодным характеристикам при создании фотодетекторов, что проявится в неудовлетворительных спектральных характеристиках, чрезмерных шумах или недостаточно высокой чувствительности. Поэтому результаты исследований солнечных элементов нельзя переносить в неизменном виде на органические фотодетекторы, которые являются самостоятельными приборами с собственным набором технологических проблем и подходов. Сегодня актуальными являются экспериментальные и теоретические исследования фотодетекторов на основе органических полупроводников, что связано с потенциальными преимуществами, предоставляемыми этими приборами в широкой области применений (например, гибкие приборы, полученные методом принтерной печати; формирование рентгеновских изображений; диагностика и др.) [1]. Целью данной работы является расчет пороговых характеристик фотопроводящих детекторов на основе органических полупроводников и анализ возможности применения такого типа фотодетекторов. Главной причиной расчета органических фотоприемников является необходимость получения в будущем структур, содержащих как OLED, так и OPD (органические фотодетекторы), так называемых интегральных систем, которые найдут широкое применение в органической оптоэлектронике.

Проведем расчет пороговых характеристик фоторезистора на основе органического полупроводника, например из материала распространенной гетероструктуры РЗНТ:РСВМ. Сочетание донорного и акцепторного органических полупроводников (РЗНТ:РСВМ) является в настоящее время хорошо изученной материальной системой, которая до сих пор обеспечивает лучшие характеристики приборов для солнечных приложений в плане долгосрочной стабильности свойств, причем эффективность преобразования энергии для этой системы составляет от 4 до 5 % [1]. В фоторезисторах на основе однородных структур обычно доминируют генерационно-рекомбинационные и тепловые шумы, а также шумы фонового излучения. Выражение для удельной порого-

вой мощности  $NEP = \frac{P_{c \text{ пор}}}{\sqrt{\Delta f}}$  с учетом данных компонент шума имеет следующий вид [2, 3]:

$$NEP = \frac{P_{c \text{ пор}}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{2h\nu}{\eta} \sqrt{\eta \Phi_{\text{фон}} A + \frac{p_0 n_0 A t}{p_0 + n_0 \tau} + \frac{kT}{q^2 R G^2}},$$

где  $\Delta f$  – полоса рабочих частот;  $h\nu$  – энергия кванта излучения;  $\eta$  – квантовая эффективность;  $\Phi_{\text{фон}}$  – поток фонового излучения, падающего на фоторезистор;  $A$  – площадь фоторезистора;  $p_0$  – концентрация дырок;  $n_0$  – концентрация электронов;  $t$  – толщина фоторезистора;  $\tau$  – эффективное время жизни;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – рабочая температура фоторезистора;  $q$  – заряд электрона;  $R$  – сопротивление фоторезистора;  $G$  – коэффициент внутреннего усиления фоторезистора. Для коэффициента внутреннего усиления фоторезистора можно записать следующее выражение [2–4]:

$$G = \frac{(b+1)}{U} \left\{ 1 - \frac{1}{U} (1 - e^{-U}) \right\}, \quad \text{где } U = \frac{\tau_{np}}{\tau} \cdot (1 + i\Omega\tau),$$

где  $\Omega$  – частота;  $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$  – отношение подвижностей электронов и дырок;  $\tau_{np} = \frac{t}{\mu E}$ ,  $\mu$  – подвижность неосновных носителей заряда,  $E$  – напряженность электрического поля в фоторезисторе,  $E = \frac{V}{t}$ ,  $V$  – приложенное к фоторезистору напряжение. Выражение для  $G$  можно упростить в некоторых частных случаях. При низких частотах ( $\Omega\tau \ll 1$ ) в общем случае можно записать:  $U = \frac{\tau_{np}}{\tau}$  и  $G = G(U)$ . При выполнении условия  $\tau_{np} \gg \tau$  получаем  $U \gg 1$  и тогда  $G = \frac{b+1}{U} = (b+1) \frac{\tau}{\tau_{np}}$ . При выполнении условия  $\tau_{np} \ll \tau$  получаем  $U \ll 1$  и тогда  $G = \frac{b+1}{2}$ , то есть если  $b \gg 1$ , то и  $G \gg 1$ . При промежуточных частотах, когда выполняется условие  $\frac{1}{\tau} \ll \Omega \ll \frac{1}{\tau_{np}}$ , или, иначе ( $\Omega\tau \gg 1$ ,  $\Omega\tau_{np} \ll 1$ ), можно записать  $G = (b+1) \frac{\sin\left(\frac{\Omega\tau_{np}}{2}\right)}{\left(\frac{\Omega\tau_{np}}{2}\right)} \rightarrow b+1$ .

При высоких частотах выполняется следующее условие:  $\Omega\tau_{np}, \Omega\tau \gg 1$ , тогда справедливо равенство  $G \cong (b+1) \frac{1}{\Omega\tau_{np}}$ . С ростом напряженности электрического поля в фоторезисторе  $\tau_{np} \rightarrow \tau_{д.р}$ ,

где  $\tau_{д.р}$  – время диэлектрической релаксации:  $\tau_{д.р} = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ , причем проводимость  $\sigma = q(\mu_n n_0 + \mu_p p_0)$ ,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала.

Для обнаружительной способности фоторезистора в случае генерационно-рекомбинационного ограничения можно записать

$$D_{\lambda}^* = \frac{\eta}{2h\nu} \sqrt{\frac{(p_0 + n_0)\tau}{p_0 n_0 t}}$$

При расчете характеристик фоторезистора на основе органического полупроводника квантовая эффективность принималась, равной 0,25 – доле распавшихся экситонов [3]. Рассматривались характеристики фоторезистора при рабочих длинах волн от 468 до 820 нм [6]. Эффективное время жизни принималось равным 0,2–0,25 мс [7], а коэффициент поглощения –  $\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1} = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1} = 5 \text{ мкм}^{-1}$  [8], при этом минимальная толщина фоторезистора выбиралась из условия  $t_{\text{мин}} \cong \frac{1}{\alpha} = 0,2 \text{ мкм}$ . Концентрация акцепторной примеси для дырочного полупроводника составляла  $N_a = 5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а концентрация электронов в равновесных условиях принималась за  $10^{18} \text{ м}^{-3}$  [8]. Для обнаружительной способности фоторезистора в случае ограничения шумами фонового излучения можно записать следующее выражение:

$$D_{\lambda}^* = \frac{1}{2h\nu} \sqrt{\frac{\eta}{\Phi_{\text{фон}}}}$$

Падающий на фоторезистор фоновый поток излучения может изменяться в зависимости от используемой оптической системы от 0 до  $10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [8].

В случае ограничения тепловыми шумами обнаружительная способность

$$D_{\lambda}^* = \frac{q\eta G}{2h\nu} \sqrt{\frac{RA}{kT}}$$

Сопротивление фоторезистора принималось равным 100 Ом [9], площадь фоторезистора составляла  $1 \text{ см}^2$ ,  $b$  изменялось от 3 до 20 [3, 10], подвижность неосновных носителей выбиралась равной  $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  [3], напряженность электрического поля составляла  $2,5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$  (при напряжении на фоторезисторе  $V = 5 \text{ В}$  и толщине фоторезистора  $t = 200 \text{ нм}$ ).

На рис. 1 приведены зависимости удельной пороговой мощности фоторезистора от напряженности электрического поля в образце при различных толщинах образца и фоновом потоке из-

лучения  $7 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Из рисунка видно, что при увеличении напряженности электрического поля значения пороговой мощности уменьшаются. Рассчитаны значения удельной пороговой мощности в случае ограничения пороговых характеристик различными механизмами шумов. Из проведенного расчета следует, что в структуре доминируют тепловые шумы, несколько меньше генерационно-рекомбинационные шумы. С увеличением напряженности электрического поля в образце пороговая мощность будет ограничена тепловыми шумами.

Проведем расчет зависимости обнаружительной способности от концентрации основных носителей с учетом генерационно-рекомбинационных и тепловых шумов. В этом случае обнаружительную способность можно записать как

$$D^* = \frac{\sqrt{A} \sqrt{\Delta f}}{P_{\text{с пор}}} = \frac{\eta}{2h\nu \sqrt{\frac{p_0 n_0}{p_0 + n_0} \frac{t}{\tau} + \frac{kT}{q^2 R A G^2}}} = \frac{\eta}{2h\nu} \left( \frac{p_0 n_0}{p_0 + n_0} \frac{t}{\tau} + \frac{kT}{q^2 R A G^2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Сопротивление фоторезистора  $R$  можно записать в следующем виде:  $R = \frac{t}{A \cdot q (\mu_n n_0 + \mu_p p_0)}$ ,

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок, равные  $2 \cdot 10^{-7}$  и  $10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  соответственно [10]. Согласно другому источнику, подвижности электронов и дырок равны  $4 \cdot 10^{-8}$  и  $2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  соответственно [3]. На рис. 2 приведены результаты расчета спектральной обнаружительной способности от концентрации основных носителей с учетом генерационно-рекомбинационных и тепловых шумов при толщине фоторезистора 0,2 мкм для разных значений подвижности носителей и различных напряженностей электрического поля в образце. Из рисунка видно, что обнаружительная способность максимальна при определенном значении концентрации основных носителей, спад при высоких концентрациях основных носителей обусловлен тепловыми шумами.

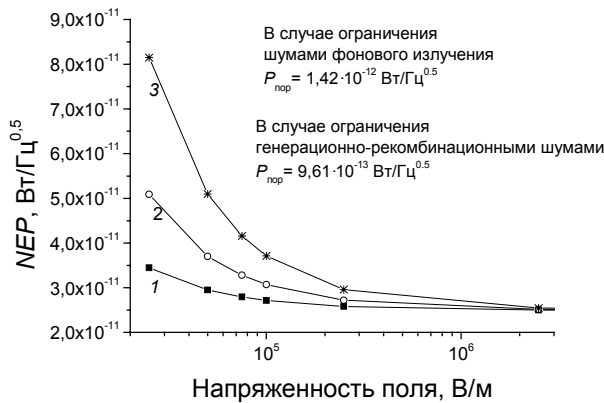


Рис. 1. Зависимости удельной пороговой мощности от напряженности поля в образце при различных толщинах фоторезистора на низких частотах (кр. 1 – толщина 0,2 мкм, кр. 2 – 0,5 мкм, кр. 3 – 1,0 мкм) при длине волны излучения 468 нм и  $b = 10$

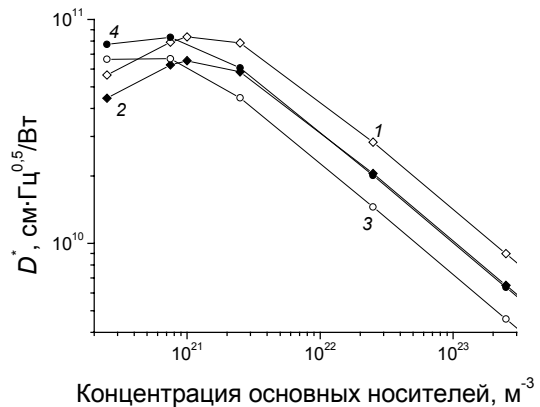


Рис. 2. Зависимости спектральной обнаружительной способности для случая ограничения генерационно-рекомбинационными и тепловыми шумами от концентрации основных носителей при значениях подвижности носителей из [10] (кр. 1, 2) и из [3] (кр. 3, 4) при напряженности электрического поля в образце  $2,5 \cdot 10^7 \text{ В/м}$  (кр. 1, 3) и  $2,5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$  (кр. 2, 4) при толщине фоторезистора 200 нм и длине волны излучения 468 нм

Таким образом, показано, что для анализируемого фоторезистора при оптимальной толщине образца 200 нм для достижения максимальных значений обнаружительной способности желательна достаточно большая напряженность электрического поля и необходимый уровень концентрации носителей заряда. При этом в расчете использовался определенный набор параметров для выбранного типа материала. Для других органических материалов также возможно достижение высоких значений обнаружительной способности фоторезистора при оптимальных значениях электрофизических и рекомбинационных параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shinar R., Shinar J., et al. Organic Electronics in Sensors and Biotechnology. – N. Y.: McGraw Hill, 2009. – 419 p.
2. Войцеховский А. В. // Изв. вузов. Физика. – 1978. – Т. 21. – № 6. – С. 125–130.
3. Киес Р. Дж., Крузе П. В., Патли Э. Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
4. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. – Новосибирск: Наука, 2003. – 636 с.
5. De Falco C., Porro M., Sacco R., and Verri M. // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2012. – No. 245–246. – P. 102–116.
6. Daami A., Vaillant J., Gwoziecki R., and Serbutoviez C. // Solid-State Electron. – 2012. – V. 75. – P. 81–85.
7. Perrier G., de Bettignies R., Berson S., et al. // Solar Energy Mater. & Solar Cells. – 2012. – V. 101. – P. 210–216.
8. Bisquert J., Garcia-Belmonte G., Munar A., et al. // Chem. Phys. Lett. – 2008. – V. 465. – P. 57–62.
9. Cheknane A., Hilal H.S., Djeflal F., et al. // Microelectron. J. – 2008. – V. 39. – P. 1173–1180.
10. Kirsch C. and Mitran S. // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112. – P. 054502.

\*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова  
Национального исследовательского Томского государственного университета,  
г. Томск, Россия  
\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия  
E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.07.13.

Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;  
Несмелов Сергей Николаевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

*A.V. VOITSEKHOVSKII, S.N. NESMELOV*

## CALCULATION THRESHOLD CHARACTERISTICS OF PHOTOCONDUCTIVE DETECTORS BASED ON ORGANIC SEMICONDUCTORS

The results of calculation of the threshold characteristics of photoconductive detectors based on organic semiconductors with account to recombination and kinetic properties are reported.

**Keywords:** *organic semiconductors, photoresistor, threshold power, detectivity, noises.*