

1. Gudelev, V.G. Antiphase polarization dynamics influenced by noise in a single-mode gas laser / V.G. Gudelev, L.P. Svirina, and Yu.P. Zhurik // Proc. of SPIE. – 1996. – V. 2792. – P. 119–125.
2. Hwang, S.K. Noise-induced chaos in an optically injected semiconductor laser model / S.K. Hwang, J.B. Gao, and J.M. Liu // Phys. Rev.E. – 2000. – V. 61, N 5. – P. 5162–5170.
3. Gao, J.B. When can noise induce chaos? / J.B. Gao, S.K. Hwang, and J.M. Liu // Phys.Rev.E. – 1999. – Vol. 82. N6. – P. 1132-1137.
4. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в четырехчастотном кольцевом газовом лазере / Л.П. Свирина // Квант. электрон. 2008. Т.38. №1. С. 1-15.
5. Свирина, Л.П. Фазовая неустойчивость в одномодовом твердотельном лазере с анизотропным резонатором / Л.П. Свирина // Опт. и спектр. 2009. Т.107. № 2. С.207-212.

УДК 621.383

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Серебрякова Л.М.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Полимерные и низкомолекулярные органические полупроводники характеризуются разнообразными оптическими и электрофизическими свойствами, технологичностью и дешевизной, что делает их перспективными материалами для широкого использования в преобразователях солнечной энергии - фотовольтаических ячейках (ФЯ) [1-5]. Такие ФЯ представляют собой многослойные тонкопленочные (с толщинами слоев от десятков до сотен нм) системы с одним (Рис. 1) или несколькими гетеропереходами. На сегодняшний день их эффективности составляют

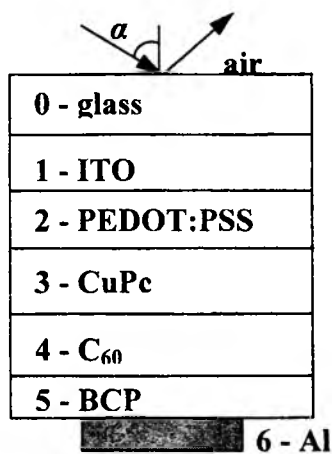


Рисунок 1

всего несколько процентов, однако общепризнано [1-5], что они могут быть повышены за счет оптимизации структуры ячейки. Эффективность преобразования ячейкой световой энергии в электрическую в конечном итоге определяется плотностью генерируемого ею фототока, в формирование которого вносят вклад следующие факторы: а) пространственное интерференционное перераспределение интенсивности светового поля по всей глубине ячейки с учетом угла паде-

ния света на ячейку и его многократных переотражений - когерентных в слоях и некогерентных в подложке; б) пространственное и спектральное распределения плотности энергии, поглощенной в активных слоях вблизи гетероперехода; в) процессы генерации и диссоциации экситонов; г) оптические и электрофизические свойства всех материалов, образующих ФЯ, и особенно материалов донорного и акцепторного слоев.

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования и оптимизации структуры ФЯ с учетом всех перечисленных факторов. Исследованы ячейки на основе четырех гетеропереходов, содержащих фталоцианины меди (CuPc) или ванадила (VOPc) в качестве донора и дибензимидазол-перилен-3,4,9,10-тетракарбоновой кислоты (PTCBI) или фуллерен (C₆₀) в качестве акцептора.

Пространственное распределение поля и поглощенной энергии в многослойной ФЯ анализировалось на основе строгого решения граничной задачи. Пусть из воздуха со стороны стеклянной подложки свет наклонно падает на пятислойную систему (Рис. 1), в которой glass - стеклянная подложка, ITO (сплав оксидов индия и олова) - катод, Al - анод, PEDOT:PSS (poly (styrenesulfonate)/ poly (2, 3-dihydrothieno [3, 4-b]-1,4-dioxin) и BCP (2,3-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) - буферные слои, CuPc и PTCBI - соответственно донорный и акцепторный слои. При этом в каждом j -ом слое ($j = 1 \div 5$) интенсивность электрического поля $I_j(x)$ и плотность поглощенной энергии $W_j(x)$ как функции координаты x ($0 \leq x < d_j$, d_j - толщина j -го слоя) описываются выражениями:

$$I_j(x) = |E_{js}(x)|^2 + |E_{jp}(x)|^2,$$

$$W_j(x) = (2\pi c \epsilon_0 / \lambda) (k_j n_j) I_j(x),$$

где c – скорость света в вакууме, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, k_j, n_j – показатель преломления и коэффициент экстинкции материала слоя, E_{js} и E_{jp} – s - и p -составляющие оптического поля, каждая из которых, в свою очередь, является векторной суммой полей прямой и обратной волн:

$$E_{jx,p}(x) = E_{jx,p}^+(x) + E_{jx,p}^-(x).$$

С учетом многократных когерентных переотражений внутри слоя амплитуды прямой и обратной волн описываются выражениями:

$$A_{jx,p}^+(x) = \bar{T}_{jx,p} \exp(i\varphi_j(x)) / (1 - \bar{R}_{jx,p} \bar{R}_{jx,p} \exp(2i\varphi_{j0})),$$

$$A_{jx,p}^-(x) = \bar{T}_{jx,p} \bar{R}_{jx,p} \exp(i(2\varphi_{j0} - \varphi_j(x))) / (1 - \bar{R}_{jx,p} \bar{R}_{jx,p} \exp(2i\varphi_{j0})),$$

где $\varphi_0 = 2\pi d_j / \lambda$ и $\varphi(x) = 2\pi x / \lambda$ – набег фазы в слое и в точке слоя с координатой x , $\bar{T}_{js,p}$, $\bar{R}_{js,p}$ – коэффициенты пропускания и отражения группы слоев выше, а $\bar{R}_{js,p}$ – ниже j -го слоя, которые выражаются через френелевские коэффициенты отражения/прохождения $r_{s,p} / t_{s,p}$ границ раздела слоев с учетом набегов фаз и затухания. Некогерентные переотражения в подложке учитываются умножением интенсивности поля в слое на поправочный коэффициент [6]. Зависимость от угла падения света на ФЯ учтена в набеге фаз, пропорциональных нормальным составляющим векторов рефракции. Она приводит к различиям для p - и s -составляющих в коэффициентах отражения/прохождения и скачках фаз на границах слоев, а также в результирующих пространственных распределениях поглощенной энергии и плотности экситонов.

Поглощение энергии, пространственное распределение плотности которой пропорционально квадрату амплитуды волны, приводит к генерации экситонов в активных слоях ФЯ. При этом представляет интерес только «эффективная» часть этой энергии, которая расходуется на генерацию экситонов, заведомо достигающих гетероперехода и вносящих вклад в фототок. Пространственные распределения плотности экситонов $p(x)$ в активных слоях находятся аналитическим решением стационарного ДУ 2-го порядка с правой частью, пропорциональной «эффективной» части поглощенной энергии:

$$L^2 p''(x) - p(x) = -(\tau/h\nu)W(x)$$

(h – постоянная Планка, ν – частота световой волны, L , τ – длина свободного пробега и время жизни экситона в материале слоя). На их основе рассчитываются токи экситонов на гетеропереходе и фототок.

Сравнение эффективностей различных донор-акцепторных пар материалов основывается на спектре действия ФЯ, представляющем собой спектральную зависимость генерируемого тока

короткого замыкания при заданной спектральной зависимости плотности мощности падающего излучения. Спектр действия $I_{k3}(\lambda)$ характеризует эффективность гетероперехода и ячейки в целом на заданной длине волны падающего излучения. С его помощью рассчитываются такие важные характеристики ФЯ, как внешняя $EQE(\lambda)$ и внутренняя $IQE(\lambda)$ квантовые эффективности:

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{k3}(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \cdot \frac{hc}{q\lambda}, \quad IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda) - T(\lambda)},$$

где $\Phi(\lambda)$ – спектральная плотность падающего на ячейку светового потока, $R(\lambda)$ и $T(\lambda)$ – коэффициенты его отражения и пропускания ячейкой. Интегральный по спектру ток к. з. I_{k3} , который определяет результирующую эффективность преобразования мощности светового потока, может использоваться как критерий оптимизации пространственной структуры ФЯ (толщин слоев, образующих гетеропереход и ФЯ). Нами были рассчитаны максимальные интегральные токи к. з. I_{k3} для четырех видов ФЯ, содержащих гетеропереходы CuPc/PTCBI (a - ФЯ-1), VOPc/PTCBI (b - ФЯ-2), CuPc/C₆₀ (c - ФЯ-3) и VOPc/C₆₀ (d - ФЯ-4) при одинаковых (фиксированных) толщинах катода ITO и анода Ag ($d_{ITO}=276$ nm, $d_{Ag}=300$ nm). Максимальные токи различны ($I_{k31}=1.87$ mA/cm², $I_{k32}=1.94$ mA/cm², $I_{k33}=2.47$ mA/cm², $I_{k34}=2.52$ mA/cm²) и достигаются при достаточно близких конфигурациях толщин слоев. Как следует из их сравнения, фталоцианины меди и ванадила в качестве донорного материала примерно равноценны, а замена PTCBI на C₆₀ приводит к существенному (~25%) росту максимального тока.

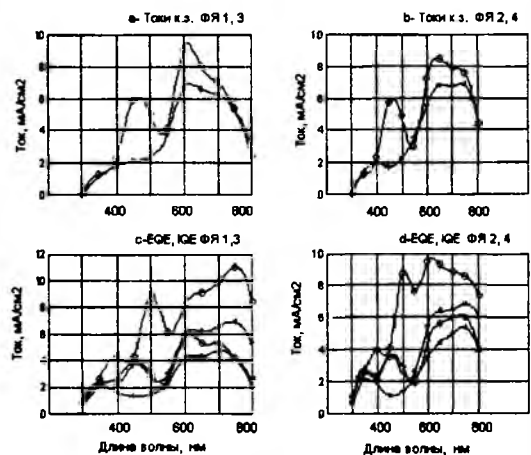


Рисунок 2

На Рис. 2 приведены спектры действия $I_{k3}(\lambda)$ (a, b), а также внешние $EQE(\lambda)$ и внутренние $IQE(\lambda)$ квантовые эффективности (c, d) для конфигураций ячеек, оптимизированных по интегральному току к. з.: ITO(276)/CuPc(26)/PTCBI

(40)/Ag(300) (ФЯ-1, маркер звездочка) и ИТО (276)/CuPc(26.5)/C60(41)/Ag(300) (ФЯ-3, маркер кружок) (а, с), а также ИТО(276)/VOPc(24.5)/PTCBI(41.5)/Ag(300) (ФЯ -2, звездочка) и ИТО (276)/VOPc(24.6)/C60(42.2)/Ag(300) (ФЯ-4, кружок) (b, d). Видно, что максимальные значения токов и эффективностей могут быть достигнуты в ФЯ-3 на основе гетеропереход CuPc/C60.

1. Brabec C., Sariciftci N., Hummelen J. // Adv. Funct. Mater., 2001. – Vol.15, No 1. P.11.

2. Peumans P., Yakimov A., Forrest R. // J. of Appl. Phys., 2003. – Vol. 93, No7. P. 3693.
3. Pettersson L. A. A., Roman L. S., Inganas O. // J. Appl. Phys., 1999. – Vol.86, № 1. P. 487.
4. Persson N.-K., Schubert M., Inganas O. // Solar Energy Materials & Solar Cells, 2004. – Vol. 83, P. 169-186.
5. Stubinger T., Brutting W. // J. Appl. Phys., 2001. – Vol. 90, № 7. P. 3632-3640.
6. В. В. Филиппов, Л. М. Серебрякова // ЖПС, 2007. – Т.74, № 6. – С.795-200.

УДК 621.833

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ТУЛГУ НА ГЛАВНЫЙ РЕДУКТОРНЫЙ ПРИВОД ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ВЕРТОЛЕТА С ОДНИМ НЕСУЩИМ ВИНТОМ

Сидоров П.Г., Плясов А.В.

Тульский государственный университет
Тула, Российская федерация

Облик современного вертолета во многом определяется обликом его главного редуктора, который зависит от воспроизводимой передаточной функции от двигателя к движителю и от пространственного расположения параллельных горизонтальных осей вращения двух входных валов приводных двигателей между собой и скрещивающейся практически под прямым углом с ними вертикальной осью одного или двух коаксиально расположенных между собой выходных валов, несущих один или два встречно-вращающихся воздушных винта ВПВ. Именно эти обстоятельства определяют облик главного редуктора двухдвигательного вертолета типа Ми-6 или Ми-26 как трехступенчатого коническо-цилиндрическо-многопоточного и возлагают кинематические функции на каждую из трех его ступеней.

На первый план выдвигается воспроизводимое передаточное число и его разбивка по трем многопоточным зубчатым ступеням, а поэтому для минимизации габаритов многопоточность третьей ступени всегда должна многократно (в три и более раз) превышать многопоточность её первых двух ступеней.

В традиционных серийных редукторах, например, Р7 двухдвигательного одновинтового вертолета типа Ми-6, включающего две рядовые двухпоточные коническую и цилиндрическую ступени от каждого двигателя на входе и замкнутую суммирующую неделимую двухступенчатую многосателлитную планетарную ступень квазидифференциального типа по схеме $(AA)_{a_1, h_1}^{h_2}$ по классификации В.Н. Кудрявцева ([1], стр. 16, табл. 1.2, вариант 3) на выходе, смонтированную на двух водилах h_1 и h_2 , одно из которых h_2 жестко закреплено на корпусе

(опорное), а другое h_1 является наиболее нагруженным выходным звеном ступени квазидифференциала в целом, [3].

Шестисателлитное исполнение в замкнутом дифференциале третьей ступени и десятисателлитное исполнение в механизме отбора мощности в замкнутом контуре строго фиксируют реальную разбивку общего передаточного числа по трем ступеням в пропорции

$$u_{i\dot{a}u} = u_{12} : u_{23} : u_{a_1, h_1}^{h_2} = 2,39 : 4,48 : 6,36 = 69,2 (62,5) \cdot (1)$$

Этот результат (1) разбивки незамедлительно сказывается на габаритно-массовых параметрах как приводного двигателя, так редуктора, в том числе, и максимальной его многопоточности в выходной ступени, которая, несмотря на асинфазность движений в кинематических потоках, не превышает десяти.

Этого явно недостаточно даже для обеспечения равнопрочности зубчатых звеньев в трех ступенях редуктора типа Р7 или ВР-26, так как первые две ступени увеличивают входной крутящий момент в 10,7 раза, резко нагружая звенья входной ступени и редуктора в целом.

Напрашивается однозначный вывод, что в трехступенчатых главных редукторах Р7 или их аналогов ВР-26 и др. неудачно, выполнены выбор ($u_{i\dot{a}u} = 69,2$) и разбивка общего передаточного числа по его трём ступеням. Причина лежит в отсутствии на период их создания новых технических решений на выходную многопоточную трансмиссию с широкими возможностями по воспроизведению передаточных функций [1-4] ($62,5 \leq u_{i\dot{a}u} \leq 100$ и более).

Исходя из минимальных габаритно-массовых параметров вертолета в целом (и не только вертолета) оптимальным решением его трехсту-