

УДК 535.399

ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ ДЛЯ ЗАХВАТА СВЕТА
В ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ© 2020 г. Р. Г. Бикбаев^{1,2,*}, С. Я. Ветров^{1,2}, И. В. Тимофеев^{1,2},
академик РАН В. Ф. Шабанов^{1,3}Поступило 20.02.2020 г.
После доработки 19.03.2020 г.
Принято к публикации 20.03.2020 г.

Предложена модель органического солнечного элемента, в которой фоточувствительный слой принимает участие в формировании таммовского плазмон-поляритона, локализованного на ее границе с многослойным зеркалом. Показано, что при конструировании таких солнечных элементов можно полностью отказаться от использования металлических контактов, что позволяет избежать нежелательных потерь в системе. Установлено, что интегральное поглощение в активном слое может быть увеличено на 10% по сравнению с оптимизированным планарным солнечным элементом.

Ключевые слова: таммовский плазмон-поляритон, органический солнечный элемент, фоточувствительный слой, локализация света

DOI: 10.31857/S2686740020030074

Органические солнечные элементы (ОСЭ) на основе сопряженных полимеров привлекают к себе все большее внимание в связи с их низкой стоимостью, легкостью изготовления, малым весом и механической гибкостью солнечных панелей, полученных с помощью технологии рулонной печати [1, 2]. Подобные ОСЭ содержат объемный гетеропереход, вследствие чего идет поиск компромисса между эффективностью поглощения фотонов и транспортировки носителей заряда. Толщина фоточувствительного слоя (ФЧС) в этом случае составляет не больше 100 нм, что значительно ограничивает эффективность поглощения падающего света. В связи с этим широкое распространение получили методы манипуляции светом для увеличения поглощения в фоточувствительном слое. Введение периодических или случайных структур в ФЧС или в интерфейсы ОСЭ приводит к перераспределению оптическо-

го поля в них и усилению поглощения фотонов за счет внутреннего рассеяния или эффекта плазмонного резонанса. Так, в 2010 г. в оптически тонких пленках поли(3-гексилтиофен-2,5-диил)/[6,6]-фенил-С61-метиловый эфир масляной кислоты (P3HT:PC61BM) с плазмонно-резонансными серебряными нанопризмами наблюдалось трехкратное усиление генерации носителей заряда [3]. Впоследствии это направление получило широкое развитие благодаря активному освоению технологий изготовления наномасштабных объектов. Другим перспективным направлением является внедрение в ОСЭ одномерных фотонных кристаллов (ФК). Расположение ФК за металлическим контактом приводит к тому, что практически 100% излучения, падающего на него, отражается и проходит через активный слой вторично, тем самым увеличивая эффективность ОСЭ [4]. В этом случае открывается возможность использования более тонких металлических пленок в качестве контактов и, как следствие, уменьшения потерь в ОСЭ. Замена прозрачного контакта ФК-структурой приводит к тому, что активный слой остается между металлической пленкой и ФК. Как известно, в подобных структурах могут возбуждаться таммовские плазмон-поляритоны (ТПП) [5], на длине волны которых возникают дополнительные линии поглощения излучения в активном слое. Этот механизм увеличения эф-

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук,
Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

³ Сибирский государственный университет науки
и технологий им М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

*E-mail: bikbaev@iph.krasn.ru

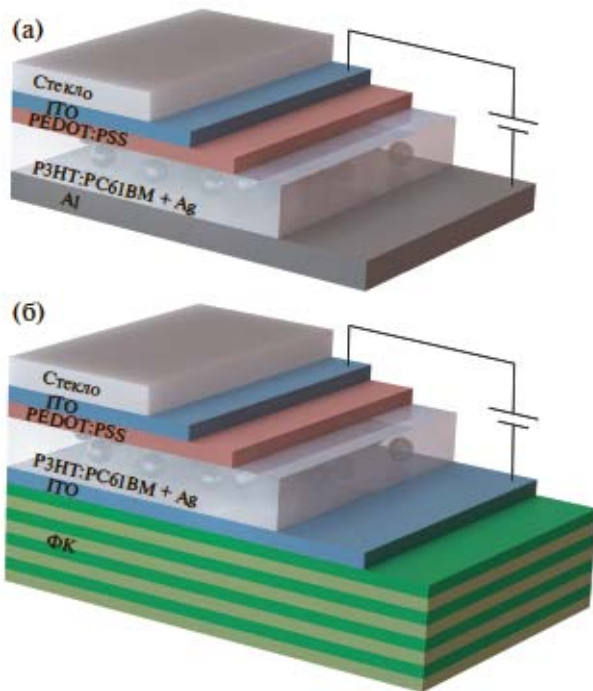


Рис. 1. а – Схематичное изображение органического солнечного элемента, допированного плазмонными наночастицами [10], б – схематическое изображение солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона.

эффективности ОСЭ был продемонстрирован в работе [6]. В рассмотренных моделях фоточувствительный слой является пассивным поглощающим элементом, не принимающим участие в формировании локализованных состояний. Новой является идея использования допированного фоточувствительного слоя в качестве зеркала, ограничивающего одномерный фотонный кристалл. В этом случае на их границе раздела локализуется ТПП [7–9], что приводит к возникновению дополнительной полосы поглощения падающего на структуру излучения и, как следствие, увеличению эффективности ОСЭ. Привлекательность такой структуры заключается в том, что можно полностью отказаться от металлического контакта, обеспечив поглощение только в ФЧС-слое.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель органического солнечного элемента, предложенного нами, изображена на рис. 1б.

В отличие от ранее изученного солнечного элемента (рис. 1а) [10], в нашей модели фоточувствительный слой ограничивает не металлическую пленку, а одномерный фотонный кристалл. Слой P3HT:PC61BM толщиной 50 нм допирован серебряными наночастицами с объемной концентрацией 20%. Толщина слоя поли(3,4-этилендиокси-

тиофен) полистиролсульфоната (PEDOT:PSS) равна 20 нм. В качестве контактов использованы пленки ITO с толщинами 15 нм и 45 нм. Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из двуоксида кремния (SiO_2) и диоксида титана (TiO_2) с толщинами $d_{\text{SiO}_2} = 75$ нм, $d_{\text{TiO}_2} = 40$ нм и диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 1.45$ и $\epsilon_{\text{TiO}_2} = 2.4$ соответственно. Мнимая часть показателя преломления ФЧС-слоя принимает максимальное значение в интервале длин волн от 350 до 600 нм и, как следствие, падающее на структуру излучение будет поглощаться ею в этом спектральном диапазоне. В длинноволновой области спектра поглощение близко к нулю. Эффективная диэлектрическая проницаемость ФЧС-слоя, допированного плазмонными наночастицами, определяется с помощью модели эффективной среды [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Зависимости действительной и мнимой части эффективной диэлектрической проницаемости, рассчитанные с помощью модели эффективной среды, показали, что ее мнимая часть достигает максимального значения на длине волны 600 нм, что обусловлено плазмонным резонансом в наночастицах. Также отметим, что действительная часть принимает отрицательные значения в широком интервале длин волн (от 360 до 570 нм), и, как следствие, в этом интервале активный слой выступает в качестве металлического зеркала. Сопряжение активного слоя, обладающего подобными спектральными характеристиками, с фотонным кристаллом приведет к формированию на их границе раздела таммовского плазмон-поляритона. Для подтверждения этого факта методом трансфер-матрицы [12, 13] был произведен расчет интегрального поглощения в ФЧС-слое для классического планарного солнечного элемента и солнечного элемента, сопряженного с ФК. Результаты расчета изображены на рис. 2а. Расчеты показали, что в предложенной модели ОСЭ интегральное поглощение в исследуемом интервале длин волн увеличивается на $\approx 10\%$ (с 50.52% до 55.36%), в сравнении с аналогичным планарным ОСЭ (рис. 1а). Это достигается за счет формирования ТПП, локализованного на границе фотонного кристалла и активного слоя, допированного плазмонными наночастицами. На длине волны ТПП ($\lambda_{\text{ТПП}} = 400$ нм) эффективная диэлектрическая проницаемость фоточувствительного слоя равна $\epsilon_{\text{eff}} = -1.007 + 2.716i$. Пространственное распределение поля на длине волны ТПП изображено на рис. 3б. Из рисунка видно, что поле локализовано на границе ФК и фоточувствительного слоя и экспоненциально затухает по обе стороны от их границы раздела. При этом поле локализо-

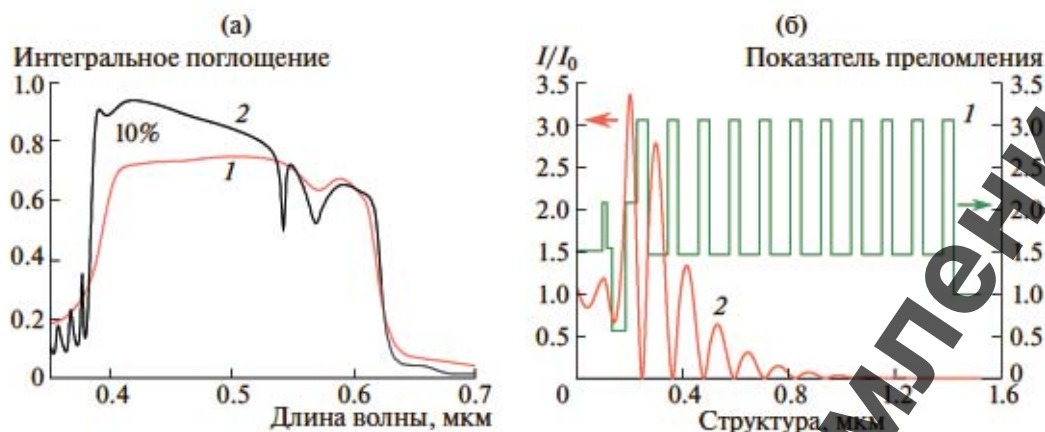


Рис. 2. а – Интегральное поглощение в фоточувствительном слое в структурах, изображенных на рис. 1а (1) и рис. 1б (2); б – пространственное распределение показателя преломления в структуре (1) и локальной интенсивности поля на длине волны ТПП (2).

вано в области, соизмеримой с длиной волны света. Важно отметить, что интенсивность поля на длине волны ТПП лишь в 3.5 раза больше интенсивности падающего поля.

Столь незначительное усиление может быть объяснено формированием на границе ФЧС–ФК таммовского плазмон-поляритона с широкой спектральной линией. Формирование такого рода состояний возможно в системах с большими потерями, как это было продемонстрировано в работе [14]. В исследуемой структуре мы имеем аналогичную ситуацию, так как действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости ФЧС на длине волны ТПП практически в 3 раза меньше ее мнимой части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель органического солнечного элемента, в котором фоточувствительный слой выступает не только в роли поглотителя, но и зеркала, принимающего участие в формировании локализованного состояния. Энергетические спектры структуры и распределение локальной интенсивности в ней рассчитаны методом трансфер матрицы. Показано, что в предложенной модели интегральное поглощение в фоточувствительном слое увеличивается на 10% в сравнении с ранее предложенными моделями ОСЭ. Установлено, что увеличение поглощения в этом случае достигается за счет формирования дополнительной полосы поглощения в ОСЭ и обусловлено формированием на границе фоточувствительного слоя и фотонного кристалла таммовского плазмон-поляритона.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке совместного гранта РФФИ, Правительства Красноярского края и

Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 19–42–240004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atwater H.A., Polman A. Plasmonics for Improved Photovoltaic Devices // *Nature Materials*. 2010. V. 9. P. 205–213.
2. Heeger A.J. Bulk Heterojunction Solar Cells: Understanding the Mechanism of Operation // *Advanced Materials*. 2014. V. 26. P. 10–28.
3. Abhishek P. et al. Plasmon-Enhanced Charge Carrier Generation in Organic Photovoltaic Films Using Silver Nanoprisms // *Nano Letters*. 2010. V. 10. P. 1501–1505.
4. Wenjuan Yu. et al. Semitransparent Polymer Solar Cells with One-Dimensional Photonic Crystals // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 101. P. 153307.
5. Kaliteevski M. et al. Tamm Plasmon-Polaritons: Possible Electromagnetic States at the Interface of a Metal and a Dielectric Bragg Mirror // *Physical Review B*. 2007. V. 76. P. 165415.
6. Xu-Lin Zhang et al. Optical Tamm States Enhanced Broad-Band Absorption of Organic Solar Cells // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 101. P. 243901.
7. Ветров С.Я. и др. Оптические таммовские состояния на границе фотонного кристалла и нанокompозита с резонансной дисперсией // *ЖЭТФ*. 2013. Т. 144. С. 1129–1139.
8. Vetrov S.Ya. et al. The Optical Tamm States at the Edges of a Photonic Crystal Bounded by One or Two Layers of a Strongly Anisotropic Nanocomposite // *Optics Communications*. 2017. V. 395. P. 275–281.
9. Bikbaev R.G. et al. Epsilon-Near-Zero Absorber by Tamm Plasmon Polariton // *Photonics*. 2019. V. 6. P. 3.
10. Kim K., Carroll D. Roles of Au and Ag Nanoparticles Inefficiency Enhancement of Poly(3-octylthiophene)/C60 Bulk Heterojunction Photovoltaic Devices // *Applied Physics Letters*. 2005. V. 87. P. 203113.

11. *Maxwell-Garnett J.C.* Colours in Metal Glasses, in Metallic Films, and in Metallic Solutions // *II. Philos. R. Soc. London.* 1906. V. 205. P. 237–288.
12. *Yeh P.* Electromagnetic Propagation in Birefringent Layered Media // *J. Optical Society of America.* 1979. V. 69. P. 742.
13. *Кориунов М.А., Шабанов А.В., Буханов Е.Р., Шабанов В.Ф.* Влияние длиннопериодической упорядоченности в структуре растений на первичную стадию фотосинтеза // *ДАН.* 2018. Т. 478. С. 280–283.
14. *Vyunishev A.M. et al.* Broadband Tamm Plasmon Polariton // *J. Optical Society of America B.* 2019. V. 36. P. 2299–2305.

TAMM PLASMON POLARITON FOR LIGHT TRAPPING IN ORGANIC SOLAR CELL

R. G. Bikbaev^{a,b}, S. Ya. Vetrov^{a,b}, I. V. Timofeev^{a,b}, and Academician of the RAS V. F. Shabanov^{a,c}

^a *Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation*

The paper proposes a model of an organic solar cell based on Tamm plasmon polariton localized at the boundary of the active layer doped with plasmon nanoparticles and a multilayer mirror. It is shown that the integral absorption in the active layer can be increased by 10% compared to the optimized planar solar cell.

Keywords: Tamm plasmon polariton, organic solar cell, photosensitive layer, light localization