

УДК 535.37:541.49:546.661

## УСИЛИТЕЛЬ/ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СВЕТА НА ОСНОВЕ САЛИЦИЛАТА ТЕРБИЯ

Л. С. Лепнев, А. А. Ващенко, А. Г. Витухновский,  
С. В. Елисева, О. В. Котова, Н. П. Кузьмина

*Создан новый усилитель/преобразователь света на основе двух последовательно соединенных фоточувствительного и светоизлучающего органических диодов, с пространственным разделением процессов умножения фототока и электролюминесценции. В светоизлучающей части в качестве активного использовался слой салицилата тербия  $[Tb(Sal)_3(TPPO)_2]$  (HSal – салициловая кислота, TPPO – трифенилфосфин оксид), а в фоточувствительной – периленовый краситель (2,9-диметил-антра(2,1,9-def,6,5,10-d'e'f')) диизотинолин-1,3,8,10-тетраон (Me-PTC)). Получено преобразование длинноволнового (600 нм) света в узкие полосы излучения  $Tb(Sal)_3(TPPO)_2$  в интервале 490–650 нм (максимальная интенсивность излучения при  $\lambda_{max} \sim 545$  нм). Предложена модель работы устройства и показано, что процессы умножения фототока и перераспределения напряжений между частями устройства сильно влияют друг на друга и определяют его работу.*

В последние годы в литературе появился ряд работ, посвященных исследованию эффекта умножения фототока в структурах, содержащих слои органических материалов (см., например, [1 – 5]). Указанный эффект связан с процессом туннелирования электронов из катода в органический слой вследствие накопления положительного заряда на границе их раздела [6].

В связи с тем, что в предложенных в литературе преобразователях света, использующих эффект умножения, фоточувствительный и излучающий слои заключены в одной структуре, при создании таких устройств возникают трудности, связанные с необходимостью согласования НОМО и LUMO уровней светочувствительного и электролюминесцентного слоев. Как следствие, непригодным для использования в упомянутых целях является большое число материалов, обладающих высокими излучательными характеристиками и люминесценцией в голубой и ультрафиолетовой областях спектра, для которых такое различие велико.

Для расширения спектра пригодных для ап-конверсии/усиления света органических материалов в данной работе предложен органический усилитель/преобразователь света с пространственным разделением функций умножения фототока и излучения, и начаты исследования его характеристик. В устройстве исключена реабсорбция испускаемого света фоточувствительной частью системы, что расширило диапазон усиления/преобразования. Таким образом, устройство кроме ап-конверсии/усиления обеспечивает также даун-конверсию/усиление света.

В фоточувствительной части усилителя/преобразователя традиционно используются пленки красителя перилена (Me-PTC), а в излучающей – органический светодиод, приготовленный нами на основе нового разнолигандного салицилата тербия  $[Tb(Sal)_3(TPPO)_2]$ , который ранее был успешно использован нами в светодиоде [7].

Фоточувствительная часть исследуемого устройства представляла собой структуры, состоящие из слоя Me-PTC толщиной  $\sim 500$  нм, заключенного между слоем ИТО (анодом) и полупрозрачным золотым катодом. Они были изготовлены методом термического напыления в вакууме  $\sim 10^{-3}$  Па.

Органический светодиод на основе салицилата тербия со структурой ИТО/PEDOT-PSS/PVK/Tb(Sal)<sub>3</sub>(TPPO)<sub>2</sub>/Ca : Al/Ag, с дыркопроводящими промежуточными слоями на основе поли(этилендиокситиофена) (PEDOT), поли(*N*-винилкарбазола) (PVK) и поли(стирен сульфоната) (PSS), использованный в излучающей части системы, был приготовлен по методике, аналогичной описанной в [7].

Инкапсуляция полученных излучающих структур производилась посредством заливки эпоксидной смолой.

Фоточувствительная часть системы помещалась в азотный оптический криостат, откачиваемый перед заливкой жидкого азота до давления  $\sim 2$  Па, с возможностью регулировки температуры.

Коэффициент умножения определялся как отношение числа сгенерированных носителей к числу фотонов, поглощенных пленкой Me-PTC.

При выполнении спектральных исследований образец освещался монохроматическим светом, выделяемым из спектра излучения ксеноновой лампы ДКСШ-1000 решеточным монохроматором МДР-3.

Исходя из спектральной зависимости коэффициента умножения сэндвичевой структуры на основе Me-PTC [1], для возбуждения фототока была выбрана длина волны 600 нм.

Зависимости коэффициента умножения от приложенного к структуре напряжения показывали заметный рост умножения фототока, начиная, примерно, с 5 В. Кроме того, величина умножения значительно возрастала при уменьшении интенсивности облучающего света, что связано с наличием процессов насыщения при высоких интенсивностях облучения. Максимальное значение умножения составляло  $\sim 10^5$  и достигалось при напряжениях на образце 25–40 В.

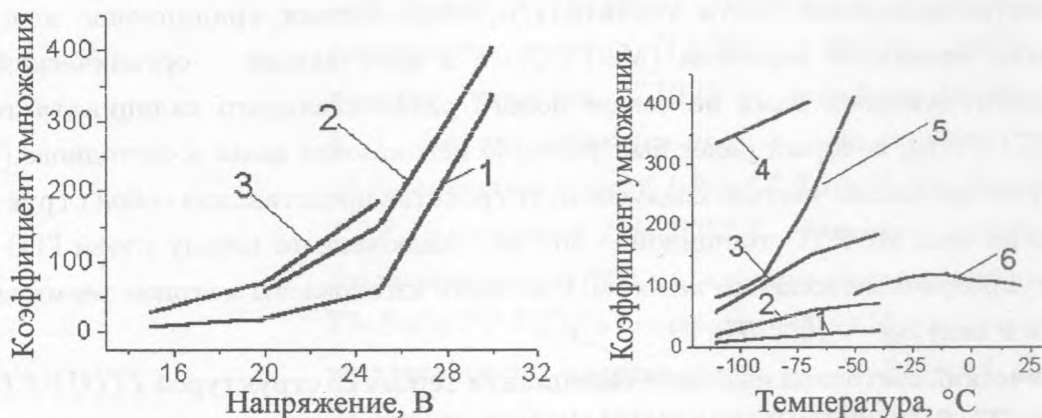


Рис. 1. Зависимость коэффициента умножения фоточувствительной части устройства от приложенного напряжения при различных температурах (1:  $-110^{\circ}\text{C}$ ; 2:  $-70^{\circ}\text{C}$ ; 3:  $-40^{\circ}\text{C}$ ).  $\lambda_{\text{освещ}} = 600 \text{ нм}$ ,  $P_{\text{освещ}} = 56 \text{ мкВт}$ .

Рис. 2. Зависимость коэффициента умножения фоточувствительной части устройства на основе Me-PTC от температуры при различных напряжениях для двух однотипных образцов. Кривые 1, 2, 3, 4 (образец 1) соответствуют напряжениям 15, 20, 25 и 30 В соответственно. Кривые 5 и 6 соответствуют напряжениям 12 и 8 В, соответственно (образец 2).

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента умножения от приложенного

напряжения при различных температурах, а на рис. 2 – температурная зависимость коэффициента умножения при различных напряжениях на двух однотипных образцах.

Коэффициент умножения растет с увеличением температуры до  $-20^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Указанный результат отличается от имеющихся в литературе сведений [1] о наличии максимума коэффициента умножения при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$ , что, по-видимому, связано с отличием в исследуемых образцах набора структурных ловушек.

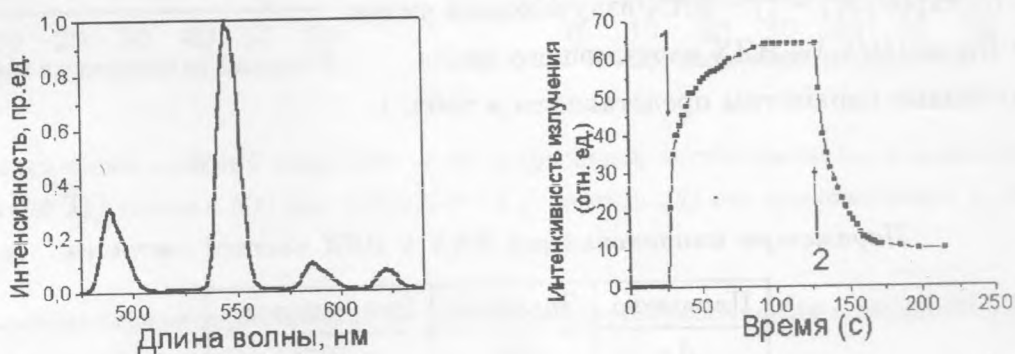


Рис. 3. Спектр электролюминесценции  $\text{Tb}(\text{Sal})_3(\text{TPPO})_2$ .

Рис. 4. Ап-конверсия света (600 нм) в усилителе/преобразователе на основе  $\text{Tb}(\text{Sal})_3(\text{TPPO})_2$  (регистрация при  $\lambda_{\text{рег}} = 545$  нм). 1 – Включение подсветки; 2 – выключение подсветки.

В спектрах электролюминесценции светоизлучающей части устройства наблюдались узкие полосы в интервале 490–650 нм, соответствующие переходам между энергетическими уровнями иона тербия(III):  $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$  (490 нм),  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$  (545 нм),  $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$  (585 нм),  $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$  (620 нм) ( $\lambda_{\text{max}} = 545$  нм, рис. 3). Регистрация преобразованного света проводилась на длинах волн вблизи максимума излучения.

При малых приложенных напряжениях наблюдалась ап-конверсия света (рис. 4), которая при напряжениях больше 17 В, в зависимости от характеристик излучающей части устройства, сменялась его усилением/преобразованием.

Для оценки условий работы усилителя/преобразователя, обеспечивающих максимальное изменение интенсивности излучаемого света при включении длинноволновой подсветки, а следовательно, максимальный квантовый выход системы в целом, проведено моделирование характеристик устройства. Такой подход позволяет также оценить условия работы устройства, обеспечивающие режимы ап-конверсии и усиления света.

С целью максимального приближения к действительности все используемые в модели параметры определены из экспериментальных вольт-амперных (ВАХ) и вольт-яркостных (ВЯХ) характеристик фоточувствительной и излучающей частей системы.

Характеристики аппроксимировались следующими экспоненциальными функциями:

$$I_d = A_d(\exp(U/t_d) - 1) - \text{темновая ВАХ фоточувствительной части};$$

$I_{il} = A_{il}(\exp(U/t_{il}) - 1) - \text{ВАХ фоточувствительной части при освещении светом } 600 \text{ нм};$

$$I = B_1(\exp(U/s_1) - 1) - \text{ВАХ излучающего диода};$$

$$J = B_2(\exp(U/s_2) - 1) - \text{ВЯХ излучающего диода.}$$

Полученные параметры представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры аппроксимации ВАХ и ВЯХ частей системы

| Параметр | Значение            | Погрешность       |
|----------|---------------------|-------------------|
| $A_d$    | $10^{-5}$           | $10^{-5}$         |
| $t_d$    | 3.18                | $10^{-2}$         |
| $A_{il}$ | 0.06                | $10^{-2}$         |
| $t_{il}$ | 8.17                | $10^{-2}$         |
| $B_1$    | $2.2 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| $s_1$    | 0.70                | $10^{-2}$         |
| $B_2$    | $4 \cdot 10^{-5}$   | $10^{-5}$         |
| $s_2$    | 0.67                | $2 \cdot 10^{-2}$ |

Полученные в результате моделирования зависимости представлены на рис. 5 и 6.

Максимум зависимости разности падений напряжения на излучающей части системы в темноте и при освещении от приложенного к системе напряжения (рис. 5) находится в другой области приложенных напряжений, чем максимум разности протекающих через систему токов и интенсивности излучаемого света. Это показывает, что процессы умножения фототока в исследуемом устройстве и перераспределения напряжений между его частями сильно влияют друг на друга, и только совместное влияние этих процессов определяет работу системы в целом.

Ток-яркостная характеристика излучающей части, полученная из её экспериментальных вольт-амперной и вольт-яркостной характеристик, имеет линейный характер. Вследствие этого вольт-яркостная характеристика усилителя/преобразователя имеет

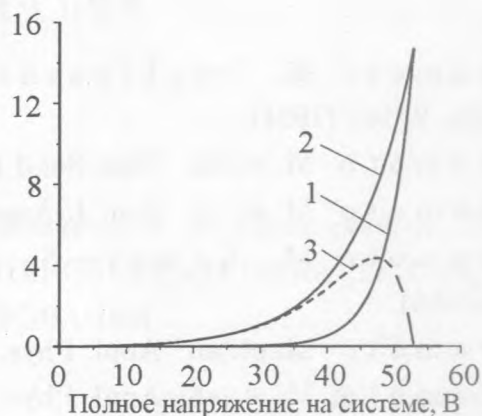
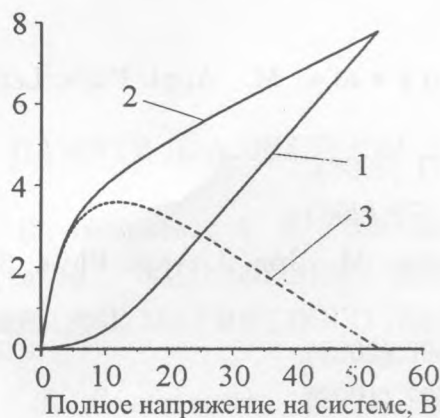


Рис. 5. Зависимость падений напряжения на излучающей части системы в темноте (1) и при освещении (2) светом 600 нм, а также их разности (3) от приложенного к системе напряжения.

Рис. 6. Вольт-амперные характеристики усилителя/преобразователя в темноте (1) и при освещении светом 600 нм (2), и их разность (3).

такой же вид, как и его вольт-амперная характеристика. Полученные зависимости падений напряжения на излучающей части от приложенного к системе напряжения и ВАХ усилителя/преобразователя (рис. 5, 6) показывают, что при повышении напряжения происходит переход от работы устройства в режиме ап- (и даун-) конверсии в режим усиления света.

Линейный вид ток-яркостной зависимости показывает, что эффективность излучающей части не зависит от приложенного напряжения, что перспективно для практического применения материала.

Работа проведена при поддержке грантами РФФИ NN 04-02-17040, 03-02-16734, 05-03-33090, 03-02-16817 и Программой развития системы ведущих научных школ, шифр РИ-112/001/039.

Авторы благодарят С. И. Торгову за предоставление материалов  $CaAl$  и  $Ag$  для нанесения контактов и П. П. Свербиля за помощь при отработке методики работы на интерференционном микроскопе при измерениях толщин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hiramoto M., Imahigashi T., Yokoyama M. Appl. Phys. Lett., **64**, No. 2, 187 (1994).
- [2] Hiramoto M. et. al. Thin Solid Films., **331**, 71 (1998).
- [3] Hiramoto M. et. al. Jpn. J. Appl. Phys., **42**, 672 (2003).
- [4] Hiramoto M., Kawase S., Yokoyama M. Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 349 (1996).
- [5] Hiramoto M. et. al. Appl. Phys. Lett., **81**, 1500 (2002).
- [6] Hiramoto M. et. al. Appl. Phys. Lett., **73**, 2627 (1998).
- [7] Eliseeva S. et. al. Synth. Met., **141**, 225 (2004).

Поступила в редакцию 26 декабря 2005 г.