

07.3

## Фотовольтаические характеристики светодиодов с двумя последовательными $p-n$ -переходами

© А.А. Соколовский, В.В. Моисеев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязино, Московская обл., Россия  
E-mail: asokol@list.ru

Поступило в Редакцию 18 августа 2020 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2020 г.

Принято к публикации 28 сентября 2020 г.

Исследованы фотовольтаические характеристики мощных ИК-светодиодов, производимых фирмой OSRAM GmbH на основе структур с двумя последовательными  $p-n$ -переходами. Определен спектральный диапазон работы фотовольтаических преобразователей на основе светодиодов с разной длиной волны излучения и показано, что КПД фотовольтаического преобразования у них достигает более 30% на длине волны 808 nm. Высокое (до 2.6 V) выходное напряжение таких преобразователей позволяет применять их для прямого питания маломощных электронных устройств оптическим излучением.

**Ключевые слова:** фотовольтаический преобразователь, напряжение холостого хода, напряжение максимальной мощности, ток короткого замыкания.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50459.18516

Известно [1], что светодиоды на основе структур GaAs/AlGaAs могут работать в качестве фотовольтаических преобразователей (ФВП) с достаточно высоким (до 45%) КПД. Такие ФВП имеют выходное напряжение 1.2–1.25 V и требуют для питания электронных устройств дополнительных повышающих преобразователей напряжения. Особенностью применения светодиодов в качестве ФВП является неэффективная для фотопреобразователей форма электродов, которая при стыковке с оптическим волокном обуславливает работу ФВП с высокой плотностью оптической мощности. Последнее обстоятельство может приводить к ускоренной деградации ФВП из-за локального перегрева полупроводниковой структуры. Основной тенденцией в развитии ФВП для преобразования лазерного излучения является разработка многопереходных структур [2–4], отличающихся повышенным (до 7 V) выходным напряжением. Однако как для „низковольтных“, так и для „высоковольтных“ ФВП требуется применение преобразователей напряжения, поскольку экономичное питание электронных устройств реализуется при питающем напряжении 2.0–3.3 V, которое является номинальным для подавляющего большинства цифровых и аналоговых микросхем, выпускаемых в настоящее время. В связи с этим актуальной является задача поиска и исследования характеристик недорогих ФВП с выходным напряжением более 2 V, которые смогут работать в системах оптического питания без дополнительных преобразователей напряжения.

С этой целью были исследованы фотовольтаические параметры мощных ИК-светодиодов на основе структур с двумя последовательными  $p-n$ -переходами, выпускаемых фирмой OSRAM GmbH и другими фирмами (табл. 1). Предпосылками для таких исследований явились соответствие длины волны  $\lambda$  излучения потен-

циальному пику фоточувствительности на  $\lambda = 808$  nm, которая применяется в системах оптического питания, большая площадь полупроводниковой структуры, ее малое затенение контактной сеткой, малое тепловое сопротивление и высокое прямое напряжение. Все эти обстоятельства позволяли надеяться на хорошие фотовольтаические свойства данных приборов.

На рис. 1 для светодиодов OSRAM разных типов приведены нормализованные зависимости фототока структуры от длины волны падающего излучения. При измерении этих спектров источником излучения являлась галогенная лампа мощностью 70 W, а регистрируемой величиной был фототок исследуемого светодиода, установленного на выходной щели монохроматора. При выполнении температурных измерений исследуемый светодиод помещался в термокамеру, а оптическое излучение на него подавалось от выходной щели монохроматора с помощью оптического волокна кварц–кварц с диамет-

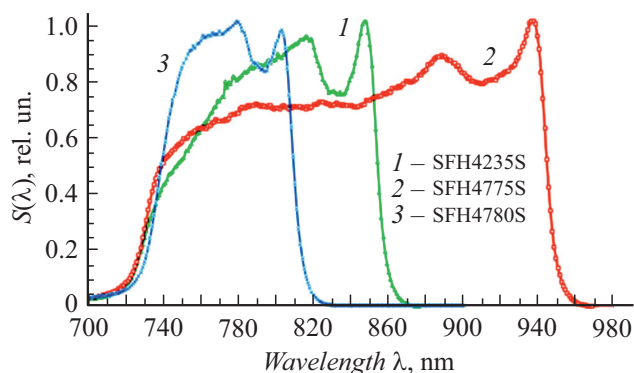


Рис. 1. Нормированные спектры фототока светодиодов OSRAM.

**Таблица 1.** Некоторые характеристики светодиодов с двумя последовательными  $p$ – $n$ -переходами (по данным производителей)

Марка	Фирма	Длина волны, nm	Излучающая область, mm	Прямое напряжение, V (при $I = 1$ A)
SFH4235S	OSRAM	850	$1 \times 1$	< 3.4
SFH4170S		850	$0.75 \times 0.75$	3.25
SFH4715S		850	$1 \times 1$	2.95
SFH4770S		850	$1 \times 1$	3.3
SFH4775S		940	$1 \times 1$	2.65
SFH4780S		810	$0.75 \times 0.75$	3.1 (0.5 A)
SFH4787S		810	$0.75 \times 0.75$	3.3 (0.5 A)
SFH4796S		850	$1 \times 1$	3.15
VSMY98145DS	Vishay	810	—	3.3
VSMY98525DS		850	—	3.1
VSMY98545DS		850	—	3.1
IR2720N8KV	Luxeon	850	—	3.3

ром световедущей жилы  $600 \mu\text{m}$ . Мощность излучения на выходе волокна составляла  $0.4 \text{ mW}$  (при  $\lambda = 850 \text{ nm}$ ).

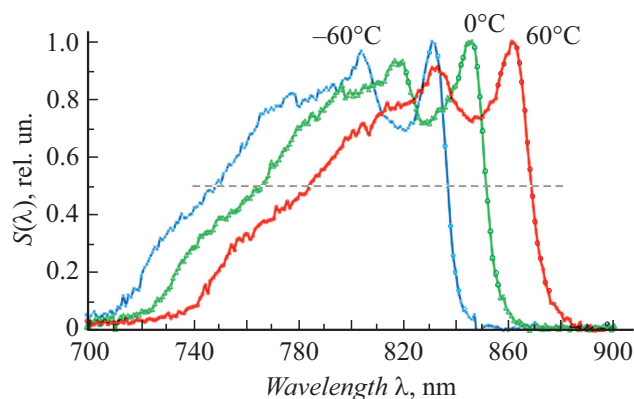
Характерной особенностью спектров является их двугорбый характер, связанный, по-видимому, с особенностями структуры, содержащей два последовательных  $p$ – $n$ -перехода. При длине волны  $\lambda = 808 \text{ nm}$ , которая чаще всего применяется в системах оптического питания, фоточувствительность приборов составляет при комнатной температуре 70–85% от максимальной величины.

Структуры с пиком излучения  $\lambda = 850 \text{ nm}$  имеют при комнатной температуре максимум фототока при  $\lambda \approx 848 \text{ nm}$  с шириной на уровне 50% около  $90 \text{ nm}$ . Структуры, излучающие на длине волны  $\lambda = 810 \text{ nm}$ , имеют максимум спектра фототока при  $\lambda = 805 \text{ nm}$  и ширину около 70–80 nm. Следует отметить неожиданную (по сравнению с другими светодиодами) ширину спектра фототока светодиодов с пиком излучения  $\lambda = 940 \text{ nm}$ , которая составляет более  $200 \text{ nm}$  и позволяет их применять в качестве ФВП с источниками с длиной волны излучения от 750 до  $940 \text{ nm}$ .

При изменении температуры от  $-40$  до  $+60^\circ\text{C}$  (диапазон рабочих температур светодиодов) спектр фототока линейно смещается с крутизной  $0.25$ – $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , что практически совпадает со смещением спектра излучения, приведенным в справочных данных. Фоточувствительность приборов на длине волны  $808 \text{ nm}$  имеет полый максимум при температуре  $-10^\circ\text{C}$  и незначительно спадает на краях температурного диапазона.

На рис. 2 показано смещение нормализованного спектра фототока светодиода марки SFH4235S с изменением температуры. Из приведенного рисунка следует, что при уменьшении фототока не более чем на 30% спектральным интервалом работы ФВП на основе светодиодов с длиной волны излучения  $850 \text{ nm}$  в промышленном диапазоне температур будет область  $800$ – $835 \text{ nm}$ .

Для последующих исследований светодиоды соприкасались со стандартным многомодовым волокном  $62.5/125 \mu\text{m}$ . Светодиод, установленный с зазором  $1.5 \text{ mm}$  относительно торца волокна, юстировался до получения максимального тока короткого замыкания

**Рис. 2.** Смещение спектра фототока с температурой.

при мощности излучения  $100 \text{ mW}$  и в таком положении фиксировался пайкой. При нулевом зазоре, несмотря на увеличение тока короткого замыкания, КПД фотопреобразования уменьшается за счет того, что вольт-амперная характеристика приобретает вид ступенчатой кривой, в результате чего существенно снижаются коэффициент заполнения (fill factor,  $ff$ ) и напряжение максимальной мощности.

На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) светодиодов OSRAM при их засветке излучением с длиной волны  $808 \text{ nm}$  при комнатной температуре. ВАХ измерялась при изменении сопротивления нагрузки ФВП в пределах  $0$ – $10 \text{ k}\Omega$ . На основе приведенных зависимостей можно выделить три группы приборов: светодиоды, излучающие на длине волны  $850 \text{ nm}$ , имеют напряжение холостого хода в фотовольтаическом режиме  $2.5 \text{ V}$ , излучающие на длине волны  $940 \text{ nm}$  —  $2.3 \text{ V}$ , излучающие на длине волны  $810 \text{ nm}$  —  $2.7 \text{ V}$ .

Обращает на себя внимание необычный для фотовольтаического преобразователя вид ВАХ для светодиода SFH4780S. Положительная производная зависимости  $I(V)$  в области напряжений  $0$ – $2 \text{ V}$  может быть связана, по нашему мнению, с тем, что изначально излучение,

Таблица 2. Фотовольтаические характеристики светодиодов OSRAM при различной мощности излучения

LED	$\eta$ , %		$U_{oc}$ , V		$U_{mpp}$ , V		$I_{sc}$ , mA		$ff$	
	100 mW	400 mW	100 mW	400 mW	100 mW	400 mW	100 mW	400 mW	100 mW	400 mW
SFH4235S	35.00	32.40	2.53	2.55	2.295	2.24	15.88	59.2	0.87	0.86
SFH4715S	35.58	29.30	2.53	2.54	2.285	2.31	16.24	52.65	0.87	0.85
SFH4770S	34.82	29.36	2.53	2.50	2.07	1.94	21.86	67.78	0.63	0.69
SFH4775S	42.23	32.85	2.29	2.30	2.067	2.09	23.72	86.62	0.78	0.66
SFH4780S	46.48	38.98	2.73	2.75	2.441	2.51	20.45	64.1	0.85	0.86

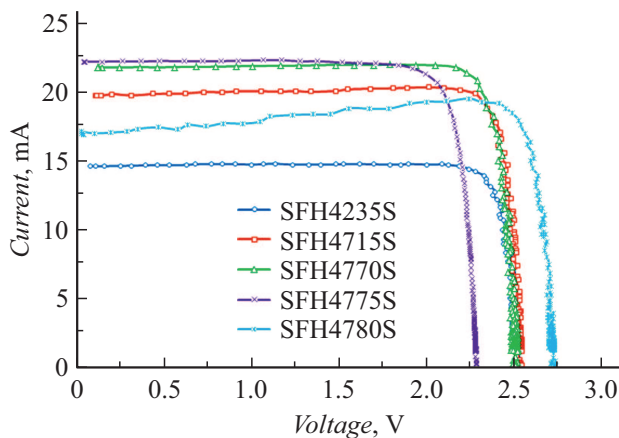


Рис. 3. ВАХ светодиодов в фотовольтаическом режиме, измеренные при комнатной температуре, при их засветке непрерывным излучением мощностью 100 мВт на длине волны 808 нм.

подаваемое на полупроводниковую структуру, попадает на крутой склон спектральной характеристики (рис. 1). При разогреве структуры падающим излучением спектр фоточувствительности смещается в длинноволновую область, что видно из рис. 2 на примере светодиода SFH4235S. В результате этого смещения за время измерения около 2 мин увеличивается токовая чувствительность структуры на длине волны 808 нм, что и приводит к формированию нарастающего участка ВАХ. На других образцах светодиодов, у которых длина волны 808 нм попадает в середину спектрального диапазона фоточувствительности, таких особенностей ВАХ не наблюдалось.

Исходя из измеренных ВАХ (измерено более 20 образцов светодиодов различных типов) определены основные фотовольтаические параметры этих приборов: эффективность преобразования  $\eta$ , напряжение холостого хода  $U_{oc}$ , напряжение максимальной мощности  $U_{mpp}$ , ток короткого замыкания  $I_{sc}$  и последовательное сопротивление  $R_s$ . Последовательное сопротивление рассчитывалось по формуле [5]:

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} - \frac{2kT}{eI_{sc}},$$

где параметр  $\frac{\Delta U}{\Delta I}$  определяется в области  $I = 0$ . Характерные значения последовательного сопротивления

составляют 1–3  $\Omega$ . Для большинства исследованных приборов коэффициент заполнения лежит в пределах 0.85–0.88 при мощности излучения до 150 мВт и уменьшается до значения 0.76–0.86 при мощности 400 мВт. Заметим, что снижение коэффициента заполнения обусловлено главным образом изменением формы ВАХ, которая может принимать вид ступенчатой кривой при большой мощности засветки.

В табл. 2 приведены фотовольтаические характеристики светодиодов OSRAM, усредненные по трем-пяти образцам каждого типа, измеренные при комнатной температуре с источником излучения на длине волны 808 нм, работающим в непрерывном режиме.

Из приведенной таблицы видно, что исследуемые светодиоды обладают высоким ( $> 2.5$  В) выходным напряжением и хорошим КПД, достигающим 46%, что позволяет их применять для питания оптическим излучением маломощных (до 100 мВт) электронных устройств. При этом в промышленном диапазоне температур светодиоды с длиной волны излучения 810 нм могут применяться в качестве ФВП совместно с источниками излучения на длину волны 770–780 нм. Эффективность ФВП на основе светодиодов SFH4775S может быть увеличена при использовании источников с длиной волны излучения 915 нм (рис. 1).

Напряжение холостого хода линейно изменяется с температурой с коэффициентом примерно  $-3$  мВ/°С, что соответствует температурному ходу прямого напряжения светодиодов. Напряжение точки максимальной мощности также линейно зависит от температуры и может быть вычислено из соотношения  $U_{mpp} \approx 2.355 - 2.7 \cdot 10^{-3} T$ , где  $T$  — температура в градусах Цельсия. Экспериментальные значения в диапазоне температур  $\pm 60^\circ\text{C}$  отличаются от расчетных не более чем на 10%.

Эффективность фотовольтаического преобразования в диапазоне температур от  $-60$  до  $+40^\circ\text{C}$  изменяется не более чем на 2% и дополнительно уменьшается еще на 5% при температуре  $+60^\circ\text{C}$ .

Таким образом, в работе показано, что светодиоды фирмы OSRAM на основе структур AlGaAs с двумя последовательными  $p-n$ -переходами обладают КПД фотозлектрического преобразования более 30% на длине волны 808 нм. Высокое выходное напряжение таких ФВП позволяет их применять для питания маломощ-

ных электронных устройств оптическим излучением в промышленном диапазоне температур без применения дополнительных преобразователей напряжения.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.А. Соколовский, Письма в ЖТФ, **44** (4), 57 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45967.17154 [Пер. версия: 10.1134/S1063785018040259].
- [2] В.М. Андреев, Н.А. Калужный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, А.С. Гудковских, *Многопереходный преобразователь*. Патент РФ № 2442242, Бюл. № 4 (2012).
- [3] S. Fafard, D.P. Masson, *Transducer to convert optical energy to electrical energy*. Patent US 2015/0162478 (2015).
- [4] [http://www.mhgopower.com/images/PPC\\_Product\\_Brief\\_Rev\\_2.4\\_03-12-2020\\_EN.pdf](http://www.mhgopower.com/images/PPC_Product_Brief_Rev_2.4_03-12-2020_EN.pdf)
- [5] М.М. Колтун, *Оптика и метрология солнечных элементов* (Наука, М., 1985).