

*Ширяев Д.С., Щеглов С.А., Козырева О.А.,  
Полухин И.С., Бугров В.Е., Одноблюдов М.А.*

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики и оптики*

## **Применение RGBW светодиодов для систем передачи данных по видимому свету**

*В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований RGBW светодиода для применения в системах беспроводной передачи данных по видимому свету. Измерены энергетические, спектральные и ВЧ-характеристики светодиода, предложена цепь согласования для подачи информационного ВЧ-сигнала на светодиод*

**Ключевые слова:** Li-Fi, VLC, связь по видимому свету, цепи согласования, СВЧ-цепи, RGB светодиоды, RGBW светодиоды, беспроводная передача данных.

Дефицит радиочастотного диапазона, широко используемого для беспроводной передачи данных, приводит к появлению новых технологий для построения высокоскоростных систем связи. Для некоторых областей применения, например, для организации локальных сетей в офисах или производственных помещениях, альтернативой, или дополнением к беспроводной радиочастотной связи, может стать связь по видимому свету (VLC – visible light communication). В 2011 году профессором кафедры мобильной связи Университета Эдинбурга Харальдом Хаасом была предложена технология Li-Fi (Light Fidelity), предполагающая использование светодиодного освещения для беспроводной передачи данных [2]. Использование технологии Li-Fi перспективно, так как емкость канала связи при использовании несущей видимого диапазона длин волн существенно превышает емкость канала на несущей из высокочастотного (ВЧ) спектра.

Однако, на практике, емкость канала связи по технологии Li-Fi оказывается существенно ниже теоретических оценок, что связано с принципом работы излучателей видимого диапазона. Чаще всего для генерации белого света используют светодиоды, изготовленные из индий нитрида галлия (InGaN). Этот материал является прямозонным полупроводником, излучающим свет в глубоком УФ и видимой областях электромагнитного (ЭМ) спектра. В коммерческих белых светодиодах, как правило, в качестве люминофора используется алюмо-итриевый гранат легированный церием (Ce:YAG), который при возбуждении синим светом, излучает в диапазоне длин волн желтого цвета. Однако, такие светодиоды имеют довольно узкую полосу пропускания, порядка нескольких МГц [3], из-за высокой инерционности люминофора. В RGB (red, green, blue) светодиодах генерация белого света происходит за счет наложения спектров от трех монохроматических источников без использования люминофора, что позволяет снизить инерционность и увеличить полосу пропускания светодиода.

Во многих работах рассматривается использование RGB-светодиодов для повышения скорости передачи данных в сети Li-Fi [4, 5]. Преимущественно, демонстрируется параллельная передача по каналам с различными цветами, и система светофильтров на приемной стороне для независимого приема по каждому каналу [6]. В данной работе

рассматриваются спектральные, энергетические и ВЧ-характеристики RGBW (red, green, blue, white) светодиода CLD-DS58 (рисунок 1), производства компании Cree LED Components для использования в сети Li-Fi.



Рис. 1. Светодиод CLD-DS58

Светодиод CLD-DS58 в беспроводной системе передачи данных по видимому свету можно использовать, реализуя один из методов передачи. Первый метод – это передача данных по нескольким каналам, т. е. цветам. Данный метод сложен для реализации поскольку требует несколько приемников излучения и их высокую селективность по длине волны. Другим подходом является передача только по одному из цветов, но с большей эффективностью, чем для люминофорного светодиода. Данный метод требует только один приемник излучения, причем не обязательно селективный по длине волны.

Во-первых, необходимо определить, по какому каналу выгоднее всего будет вести передачу энергетически. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) излучателей исследуемого светодиода приведены на рисунке 2. Рабочий ток для каждого чипа в светодиоде составляет 350 мА [7]. Из графика на рисунке 2 видно, что красный чип выходит на рабочий ток при меньшем напряжении. Следовательно, затраты электрической мощности минимальны, что делает канал передачи по красному цвету наиболее выгодным с точки зрения затрат электрической энергии.

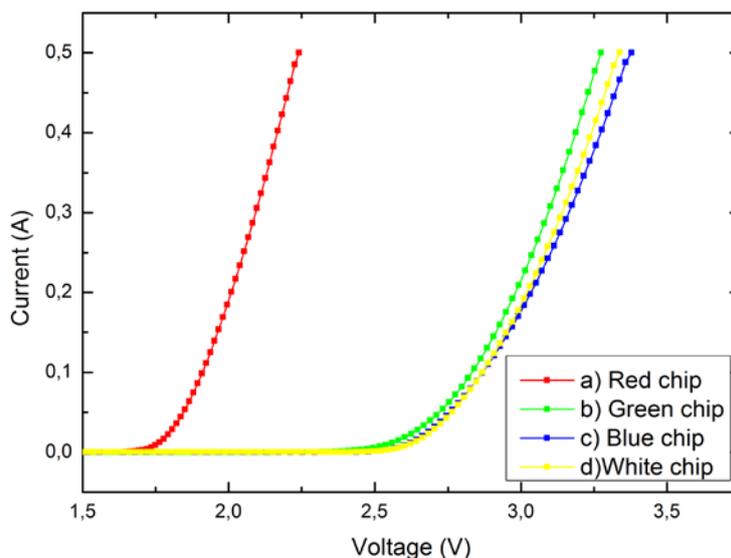


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика красного (а), зеленого (б), синего (с), белого (д) чипов светодиода.

Далее исследовались спектральная и радиометрическая характеристики светодиода. Спектр излучения, полученный спектрометром BTS256-LED компании Gigahertz optik, показан на рисунке 3. Максимумы интенсивности излучения соответствуют длинам волн:

красный –  $\lambda_R=630$  нм, зеленый –  $\lambda_G=529$  нм, синий –  $\lambda_B=453$  нм. Белый чип светодиода не рассматривается, так как представляет синий чип, покрытый люминофором. Поток излучения для красного чипа составляет  $\Phi_R=1.8$  мВт, для зеленого  $\Phi_G=0.7$  мВт, для синего  $\Phi_B=12.3$  мВт. Поток от синего чипа почти вдвое превышает поток от белого люминофорного ( $\Phi_W=7$  мВт), а от красного в несколько раз меньше, чем от синего, однако с учетом характеристик, показанных на рис.2, красный канал остается наиболее эффективным.

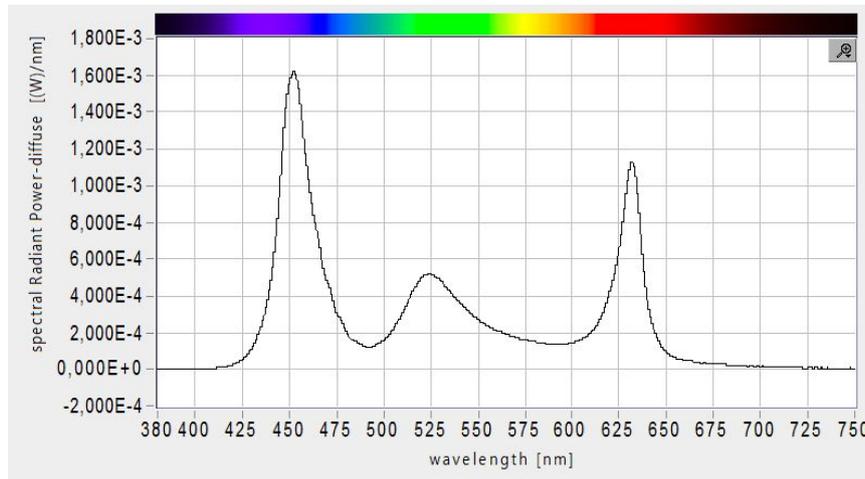


Рис. 3. Спектр светодиода CLD-DS58 при силе тока  $I=100$  мА через каждый чип.

При передачи информации по видимому свету необходимо учитывать спектральную характеристику приемника излучения. В качестве приемника излучения использовался фотодиод FDS-100, производства фирмы ThorLabs - кремниевый фотодиод, чувствительный в диапазоне длин волн от 350 нм до 1100 нм. Отклик фотодиода максимален на длине, соответствующей красному максимуму излучения (Таблица 1). Измерения проводились для системы светодиод-фотодиод, размещенных друг от друга на расстоянии 6 см.

Таблица 1.

| Чип     | Ток протекающий через чип ( $I_D$ ), мА | Падение напряжения на чипе ( $U_D$ ), В | Фототок ( $I_F$ ), мкА |
|---------|---|---|------------------------|
| Красный | 100                                     | 1.9                                     | 250                    |
| Зеленый | 100                                     | 2.79                                    | 94                     |
| Голубой | 100                                     | 2.84                                    | 144                    |
| Белый   | 100                                     | 2.83                                    | 154                    |

Из полученных данных следует, что при использовании красного канала, приемник будет иметь самую высокую чувствительность.

По результатам исследований энергетических и спектральных характеристик RGBW светодиода CLD-DS58 оптимальным для передачи данных является канал, на длине волны  $\lambda_R=630$  нм.

Далее исследовались ВЧ-характеристики светодиода. Были измерены сопротивление и емкость красного чипа в рабочей точке ( $U_{см}=2.1$  В,  $I=350$  мА), которые составили

$R=8$  Ом и  $C=70$  пФ. Измерения выполнялись с помощью RLC-метра компании Rohde&Shwartz HM8118.

Для эффективной модуляции светодиода информационным ВЧ-сигналом, необходимо, чтобы выполнялось условие согласования сопротивлений диода и ВЧ-тракта. Расчет схемы согласования проводился на основе измеренных значений емкости и сопротивления светодиода. В схеме согласования (рис.4) используется трансформатор (Т1) с коэффициентом трансформации  $k=2$  для повышения активной части сопротивления светодиода, Г-образная согласующая цепь на реактивных элементах (L1, C1), и резистор R1 для расширения полосы согласования. Номиналы элементов:  $R1=5.6$  Ом,  $L1=250$  нГн,  $C1=220$  пФ.

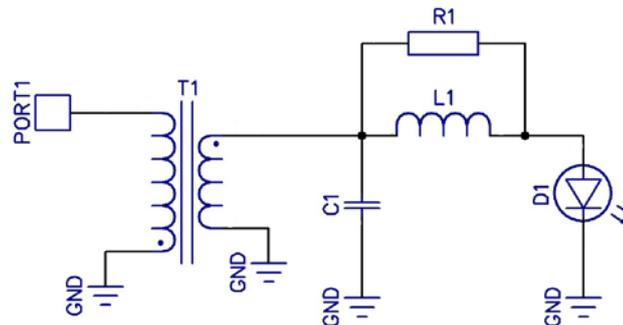


Рис. 4. Согласующая схема для светодиода CLD-DS58.

На рисунке 5 показана рассчитанная для данной схемы, зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты. Считая светодиод согласованным при  $КСВ < 2.5$ , согласование достигается в полосе до 50 МГц.

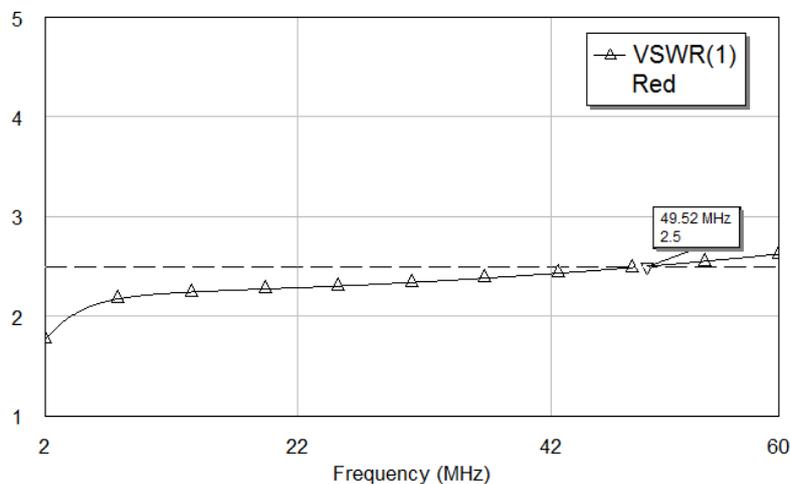


Рис. 5. Зависимость КСВ от частоты.

В работе были рассмотрены энергетические, спектральные и ВЧ-характеристики RGBW-светодиода CLD-DS58 для его использования в системе передачи данных по технологии Li-Fi. Исследования показали, что для передачи данных красный чип обладает оптимальными характеристиками. Предложена схема для модуляции красного чипа, позволяющая достичь согласование в частотном диапазоне до 50 МГц, что может обеспечить скорость передачи в канале связи порядка 45 Мбит/с.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», шифр 2017-14-582-0001-084, соглашение №14.581.21.0029, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0029.

#### Библиографический список

1. Cisco – Global Home Page [Электронный ресурс]: «Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021» ; Ин-т «Cisco Mobile». VNI, 2017. URL: <https://bit.ly/2vu69MQ> (дата обращения: 25.04.2018).
2. Ted: Ideas worth spreading [Электронный ресурс]: «TED Talk online by Harald Haas on wireless data from every light bulb» ; Ин-т TED Conferences. URL: <https://bit.ly/2HEtpdP> (дата обращения: 26.04.2018).
3. Le Minh H., Brien D. O., Faulkner G., Zeng L., Lee K., Jung D. and Oh Y. 80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED 34th European Conf. on Optical Communication ECOC, September 21-25, 2008 year – Brussels: - Brussels, Belgium.
4. F. M. Wu, C. T. Lin, C. C. Wei, C. W. Chen, Z. Y. Chen, H. T. Huang, Sien Chi Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication IEEE Photonics Journal, Volume 5, Number 4, August 2013 year.
5. Yiguang Wang, Xingxing Huang, Li Tao, Jianyang Shi, and Nan Chi 4.5-Gb/s RGB-LED based WDM visible light communication system employing CAP modulation and RLS based adaptive equalization Optics Express, Volume 23, Number 10, May 18, 2015 year.
6. G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED Optics Express, Volume 20, Number 26, 10 December, 2012 year.
7. Cree LED components [Электронный ресурс]: «XLamp XM-L Color Brightest, smallest multi-color LED of its class» ; Ин-т «Cree, Inc.». 2018. URL: <https://bit.ly/2HAClv7> (дата обращения: 26.04.2018).
8. Sujan Rajbhandari, Jonathan J. D. McKendry, Johannes Herrnsdorf, Hyunchae Chun, Grahame Faulkner, Harald Haas, Ian M Watson, Dominic O'Brien and Martin D. Dawson A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications Semiconductor Science and Technology, Volume 32, Number 2, January 4, 2017 year.