

DOI 10.53364/24138614\_2022\_27\_4\_37  
УДК 519.6

<sup>1</sup>Асқадұлы Қ\*, <sup>1</sup>Срайлова М.

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

\*E-mail: [Askaduly@mail.ru](mailto:Askaduly@mail.ru)

## СВЯЗЬ В ВИДИМОМ СВЕТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНЕГО GaN μLED И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЦВЕТА ИЗ ФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО ПОЛИМЕРА

### КӨК GaN АРҚЫЛЫ КӨРІНГЕН ЖАРЫҚТА БАЙЛАНЫС μLED ЖӘНЕ ФЛЮОРЕСЦЕНТТЫ ПОЛИМЕР ТҮСТІ ТҮРЛЕРДІРУ

### COMMUNICATION IN VISIBLE LIGHT USING BLUE GaN μLED AND FLUORESCENT POLYMER COLOR CONVERTER

**Аннотация.** Представлен новый метод достижения высокоскоростной связи в видимом свете (VLC) с использованием белого света, генерируемого синим GaN μLED и желтым флуоресцентным сополимером. Мы генерировали белый свет, пригодный для освещения помещения, оптимизируя соотношение между синей электролюминесценцией μLED и желтой фотолюминесценцией сополимерного преобразователя цвета. Воспользовавшись высокой пропускной способностью компонентов, мы продемонстрировали скорость 1,68 Гбит/с на расстоянии 3 см (при освещенности 240 люкс). Насколько нам известно, это самые быстрые результаты VLC белого света с использованием одной комбинации синего светодиода и преобразователя цвета.

**Ключевые слова:** VLC, Li-Fi, интенсивность, модуляция, диммирование, ШИМ, оптический OFDM с обратной полярностью.

**Аңдатпа.** Көк GaN μLED және сары флуоресцентті сополимер арқылы жасалған ақ жарықты пайдаланып, жоғары жылдамдықты көрінетін жарық байланысына (VLC) қол жеткізудің жаңа әдісі ұсынылған. Біз μLED көк EL және сополимер түсті түрлендіргіштің сары фотолюминесценциясының арақатынасын оңтайландыру арқылы ішкі жарықтандыруға қолайлы ақ жарық жасадық. Құрамдас бөліктердің жоғары өткізу қабілетін пайдалана отырып, біз 3 см-де (240 люксте) 1,68 Гбит/с-қа қол жеткіздік. Біздің білуімізше, бұл жалғыз көк жарық диоды мен түсті түрлендіргіш комбинациясын пайдаланатын ең жылдам ақ жарық VLC нәтижелері.

**Түйін сөздер:** VLC, Li-Fi, қарқындылық, модуляция, күңгірттеу, PWM, кері полярлығы бар оптикалық OFDM.

**Abstract.** A new method to achieve high speed visible light communication (VLC) using white light generated by a blue GaN μLED and a yellow fluorescent copolymer is presented. We generated white light suitable for indoor lighting by optimizing the ratio between the blue EL of a μLED and the yellow photoluminescence of a copolymer color converter. Taking advantage of the high bandwidth of the components, we achieved 1.68Gbps at 3cm (at 240 lux). To the best of our knowledge, these are the fastest white light VLC results using a single blue LED and color converter combination.

**Keywords:** VLC, Li-Fi, intensity, modulation, dimming, PWM, optical OFDM with reverse polarity.

**Введение.** Недавний повышение эффективности светоизлучающих диодов (LED) сделало их сильным кандидатом заменить существующие источники освещения. Связь в видимом свете (VLC) привлекательна, поскольку любая инфраструктура освещения на основе светодиодов обеспечивает возможность передачи данных и освещения.

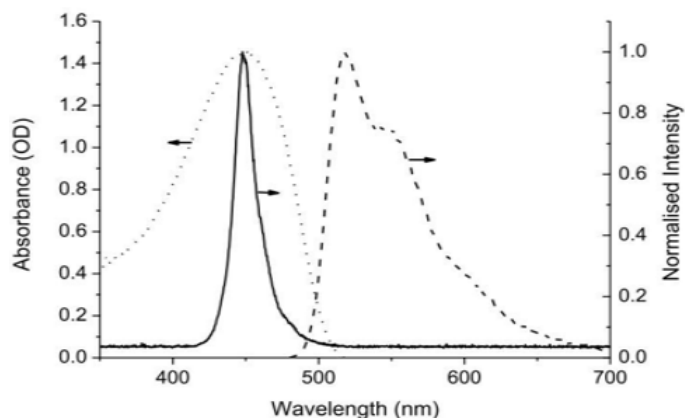
Однако хорошо известным узким местом в VLC является медленный отклик коммерческих белых светодиодов (WLED) [1]. Как правило, они основаны на чипе синего светодиода с люминофором, который поглощает часть излучения синего светодиода и повторно излучает широкий желтый спектр. Однако время жизни фотолюминесценции обычные люминофоры слишком длинные (мкс), чтобы поддерживать высокие скорости передачи данных.

Как правило, оптический фильтр короткого пропускания используется для подавления медленного желтого компонента в приемнике, увеличивая ширину полосы модуляции (Ч/Б) с нескольких МГц до 20 МГц. Несмотря на низкую пропускную способность, имеется достаточная мощность для достижения высоких скоростей передачи данных с использованием модуляции более высокого порядка, а скорость передачи данных 1 Гбит/с была достигнута с использованием люминофора и синего чипа WLED [2].

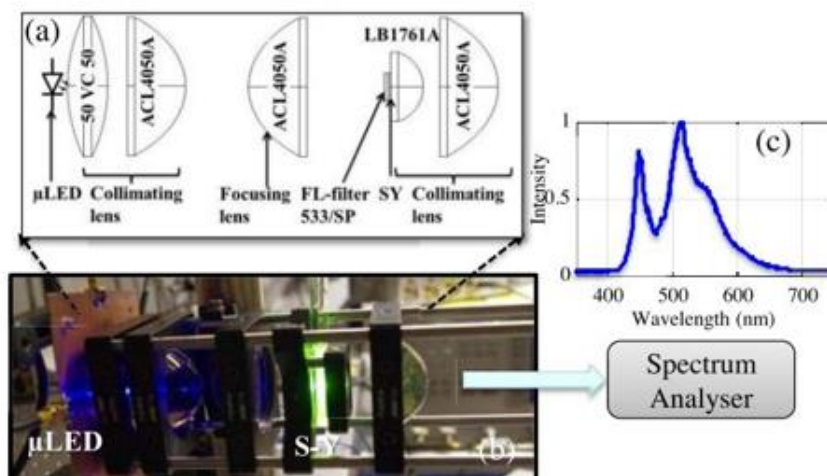
Также предпринимаются усилия по улучшению самих светодиодов. Примером являются светодиоды с резонансным резонатором (RCLED). RCLED позволяют передавать данные со скоростью до 3 Гбит/с по пластиковому оптическому волокну (POF) [3]. Однако их нелегко адаптировать для освещения белым светом. В [4] синие  $\mu$ LED на основе GaN с малой емкостью перехода и более высокой плотностью тока использовались для демонстрации беспроводного VLC со скоростью 512 Мбит/с. Используя такие устройства, мы продемонстрировали самую быструю беспроводную передачу с одним светодиодом 3 Гбит/с в недавней публикации [5], но опять же эти источники не белые.

В этой статье мы исследуем возможность использования сопряженного полимера для преодоления ограничений существующих люминофоров. Сопряженные полимеры представляют собой важный класс органических полупроводников, обладающих высокими квантовыми выходами флуоресценции, коротким (1 нс) временем жизни при излучении и простыми процессами переработки из растворов. Еще одним преимуществом использования полимеров является то, что их можно смешивать для получения белого света более высокого качества, чем обычный синий светодиодный чип с люминофором [6]. Эти свойства делают их привлекательной альтернативой современным люминофорам.

В разделе генерации белого света процесс генерации белого света показан после введения характеристик, используемого нами GaN  $\mu$ LED и преобразователя цвета SY. В разделе III подробно описываются коммуникационные характеристики генерируемого белого света с применением оптического мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM). В разделе IV обсуждаются практические вопросы и текущая работа, и раздел V завершает это письмо, обращаясь к потенциалу предлагаемого метода.



**Рисунок 1.** Спектр ЭЛ GaN  $\mu$ LED (сплошная линия). Спектр ФЛ (штриховая линия) и поглощения (пунктирная линия) SY.



**Рисунок 2.** Экспериментальная установка для генерации белого света (а) блок-схема установки, (б) изображение установки и (в) измеренный спектр излучения GaN  $\mu$ LED, освещающего образец СИ оптической плотности 0,96.

### Генерация белого света

#### А. Свойства GaN $\mu$ LED и Super Yellow

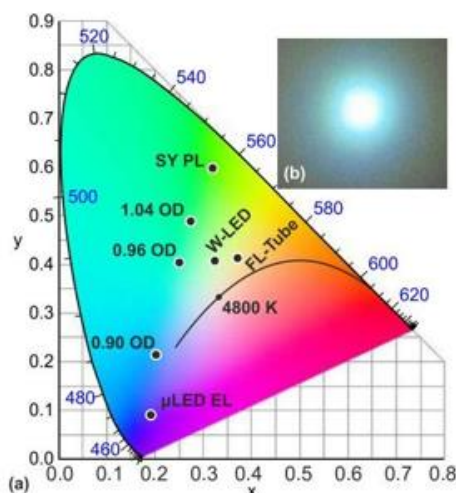
На рисунке 1 показаны спектр излучения ЭЛ GaN  $\mu$ LED и спектр излучения и поглощения ФЛ SY.

Микросветодиод GaN, используемый в этом письме, имеет диаметр 50 мкм, электрическо-опто-электрическую (ЕОЕ) полосу пропускания 60 МГц и общий лучистый поток 3,5 мВт при 60 мА. Более высокий управляющий ток может увеличить В/В [4], но это значение было выбрано для обеспечения работы в линейной области отклика.

SY имеет квантовый выход фотолюминесценции (PLQY) 60%. Измеренная полоса пропускания SY в растворе составляет > 200 МГц, что может обеспечить примерно в 50 раз большее значение В / W, чем у обычного преобразователя цвета на основе люминофора, из-за короткого времени жизни флуоресценции (100 пс) материала. Подробнее о свойствах SY можно узнать в [7].

**В.** Процесс генерации белого света на рисунке 2 показана экспериментальная установка, используемая для генерации белого света. Синий свет от GaN  $\mu$ LED коллимировался и

фокусировался на преобразователь цвета SY с помощью ряда линз с высокой числовой апертурой (NA), как показано на рисунке.



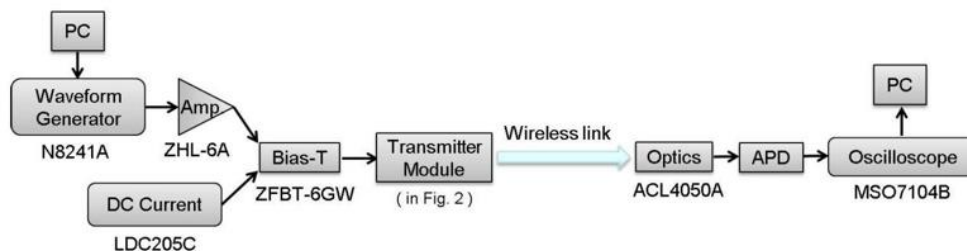
**Рисунок 3.** (а) Представление полученных цветов на диаграмме цветности CIE и геометрическом местоположении черного тела (сплошная линия). Для сравнения представлены цвета коммерческого WLED и люминесцентной лампы. (б) Фотография проецируемого света раствора с оптической плотностью 0,96.

Была использована конструкция оптики с высокой числовой апертурой из-за ограниченной оптической мощности  $\mu$ LED и его ламбертовского профиля излучения (угол половинного расхождения  $60^\circ$ ). Преобразователь цвета SY состоит из кюветы с длиной оптического пути 2 мм, содержащей SY в растворе хлорбензола. Это формирует ламбертовский излучатель, и смесь испускаемого желтого и проходящего синего, испускаемая кюветой, содержащей материал SY, сильно расходится. Для сбора и коллимации этого излучения используется другая оптическая система с высокой числовой апертурой. Для повышения эффективности излучения в прямом направлении непосредственно перед преобразователем SY установлено дихроичное зеркало, прозрачное для синего, но отражающее желтый свет. Это отражает часть желтого света, распространяющегося назад, в прямом направлении, увеличивая эффективность примерно на 20%. Состав белого света, генерируемого в этом процессе, можно изменить, изменив концентрацию раствора SY, который регулирует как коэффициент пропускания светодиодного света, так и интенсивность желтого излучения. Экспериментально установлено, что СИ подчиняется закону Бера-Ламберта, а оптическая плотность (ОП) пропорциональна концентрации раствора:  $ОП = 5,2c$ , где  $c$  - концентрация в мг/мл.

На рис. 3 (а) показан график CIE цвета, генерируемого при изменении оптической плотности. Мы экспериментально проверили, что ОП 0,96 приводит к наименьшему расстоянию от эталонной белой точки (0,33, 0,33). Это приводит к холодному белому свету, как показано на рис. 3(б). Для сравнения мы также измерили координаты коммерческого WLED и люминесцентной лампы, и они также показаны на рисунке.

**Коммуникационная производительность.** Оптический OFDM со смещением постоянного тока (DCO-OFDM) [8] используется для передачи данных, поскольку DCO-OFDM имеет самую высокую спектральную эффективность среди оптических схем OFDM, что делает его подходящим для системы VLC с ограниченной полосой пропускания.

**A. DCO-OFDM** и преобразование сигнала OFDM — это спектрально эффективная схема модуляции с несколькими несущими, использующая только половину B/W по сравнению с обычными частотами.



**Рисунок 4.** Экспериментальная установка для передачи данных.

Экспериментальная установка для передачи данных использует схему частотного мультиплексирования (FDM). Чтобы применить его к системам, основанным на прямом обнаружении с модуляцией интенсивности (IM-DD), последовательность во временной области  $x(n)$  должна иметь только положительные действительные значения. Это условие достигается ограничением символов  $X(m)$  на поднесущих OFDM, чтобы они имели эрмитову симметрию (1). Далее следует ограничение сигнала (2) и добавление постоянного тока (3)

$$X(m) = X^*(N_{fft} - m) \tag{1}$$

$$x(n) = \frac{1}{N_{fft}} \sum_{m=0}^{N_{fft}-1} X(m) \exp(j2\pi mn / N_{fft}),$$

$$C_{low} < x(n) < C_{up} = C_{low}, x^*(n) \tag{2}$$

$$= \text{Кубок}, x^*(n) \quad \text{Кубок}$$

$$x(n) = \tilde{x}(n) + DC \tag{3}$$

где \* обозначает эрмитову операцию.  $N_{fft}$ ,  $C_{low}$  и  $C_{up}$  означают размер быстрого преобразования Фурье (FFT), нижний и верхний уровни ограничения соответственно.

Уровень отсечения, учитывая смещение постоянного тока, является одним из наиболее важных факторов, определяющих общую производительность DCO-OFDM. В общем, уровень отсечки выражается по отношению к стандартному отклонению сигнала во временной области ( $\sigma$ ).

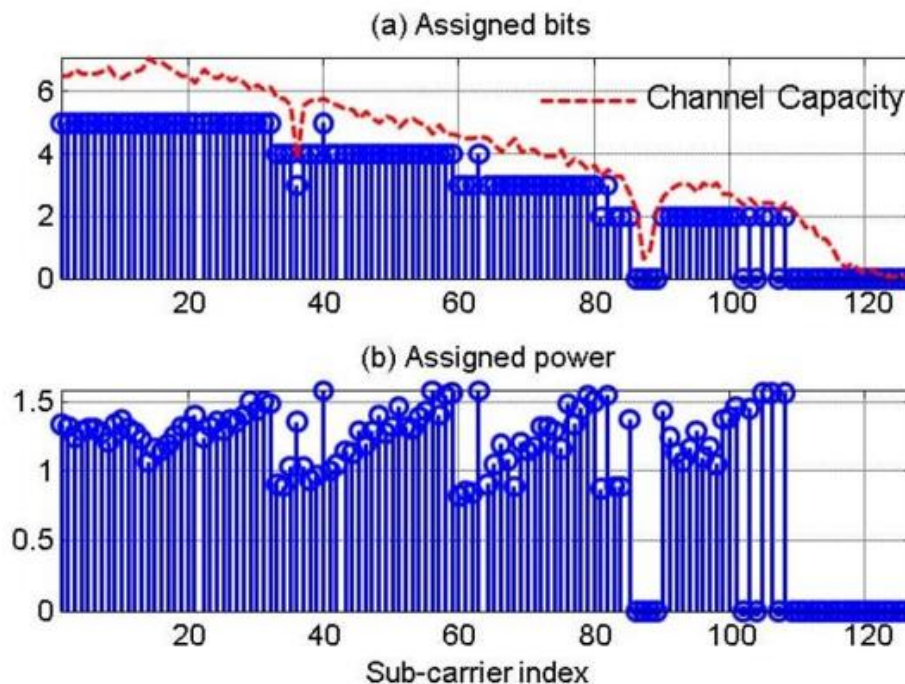
Для числа поднесущих, превышающего 64, статистика шума ограничения соответствует распределению Гаусса, и, следовательно, можно предсказать

оптимальный уровень ограничения [9]. На практике оптимальные уровни находятся в диапазоне от  $\pm 2\sigma$  до  $\pm 4\sigma$ , в основном в зависимости от динамического диапазона каждой системы, частотной характеристики и нелинейности. Мы экспериментально определили, что отсечение  $\pm 2,5\sigma$  является оптимальным для используемой нами системы

**В. Экспериментальная установка.** На рисунке 4 показана экспериментальная установка для передачи данных. Входящий битовый поток кодируется и преобразуется в дискретный сигнал во временной области с помощью операции обратногобыстрого преобразования Фурье (IFFT) и добавления циклического префикса. Этот сигнал обрезается соответствующим образом, чтобы гарантировать положительный сигнал и избежать нелинейных искажений, вызванных компонентами передатчика и приемника. Для обработки MATLAB.

Дискретный сигнал преобразуется в аналоговый сигнал с помощью генератора сигналов произвольной формы (AWG) Agilent N8241A. Далее следует усиление широкополосным усилителем Mini Circuits ZHL-6A. В сочетании со смещением постоянного тока (DC) от драйвера лазера (LDC205C) через смещение-T, Mini Circuits ZFBT-6GW, модулированная

интенсивность передается, используя модуль, описанный на рис. 2. Модулированный белый свет, генерируемый модулем, фокусируется на приемнике на основе лавинного фотодетектора (APD) через собирающую линзу.

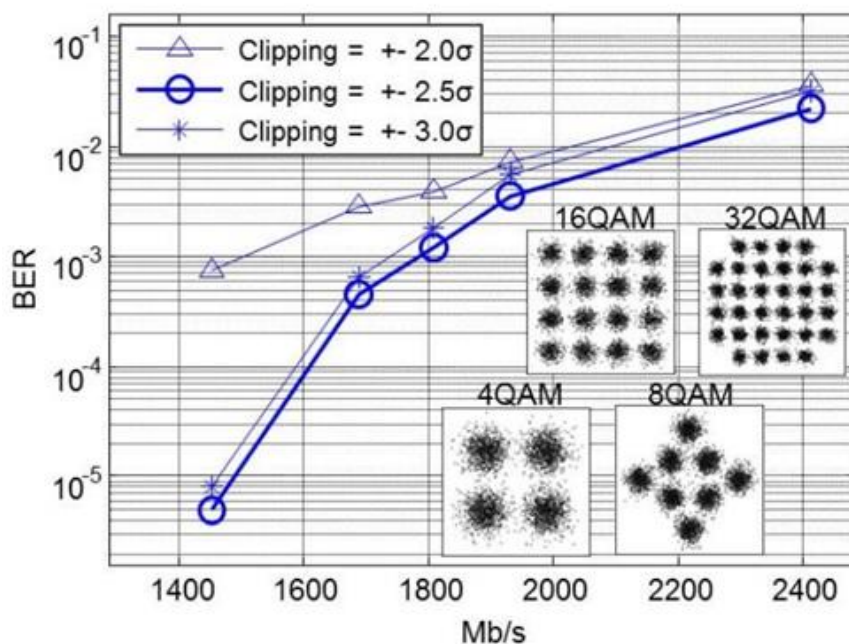


**Рисунок 5.** (а) схема загрузки по битам и (б) по мощности для 1,8 Гбит/с на 3-сантиметровом канале. Расстояние (240 лк) от OD 0,96.

Было использовано расстояние связи 3 см, а уровень освещенности приемника был измерен 240 люкс. Это низкий уровень освещенности. (Обычно 400 люкс считается хорошим освещением.) Выходной сигнал фиксируется цифровым осциллографом Agilent MSO7104B. Наконец, обработка сигнала для восстановления выполняется в MATLAB® после синхронизации.

**С. Условия эксплуатации.** Учитывая характеристики  $\mu$ LED, оптимальная точка смещения и размах напряжения переменного тока были найдены путем сравнения отношения сигнал-шум (SNR), полученного в результате процедуры обучения. На каждой поднесущей было передано 200 известных символов биполярной фазовой манипуляции (BPSK), а дисперсия шума и ОСШ были оценены на основе принятой статистики шума. Оптимальная точка смещения была при 60 мА, а размах переменного тока составлял 3,5 В размах, что приводило к полной глубине модуляции.

Размер БПФ (Nfft) 256 и длина циклического префикса (Ncp) 3 были выбраны, поскольку не было значительного улучшения для большего CP (накладные расходы CP составляли ~1,2%). Частота дискретизации (Fs) генератора сигналов произвольной формы составляет 1250 Мвыб/с, что дает максимально достижимую одностороннюю полосу Ч/Б 625 МГц. В данном письме мы использовали разрядно-мощностную схему загрузки, так как она считается оптимальной для достижения пропускной способности канала [10].



**Рисунок 6.** Результаты BER и набор восстановленных созвездий при 1,81 Гбит/с и отсечении  $\pm 2,5\sigma$  с  $1,2 \times 10^{-3}$  BER.

На рис. 5 показаны назначенные биты и мощность на каждой поднесущей. Поскольку последние 19 поднесущих не использовались, полоса пропускания, которую занимал сигнал OFDM, составляла 531 МГц. Хорошо видно, что примененная схема позволяет приблизиться к пропускной способности канала, полученной из оцененного ОСШ.

**Результат и обсуждение.** На рис. 6 представлены результаты измерения частоты ошибок по битам (BER). Как показано, отсечение  $\pm 2,5\sigma$  оказалось оптимальным для используемой нами системы. Кривая BER с отсечкой  $\pm 3,0\sigma$  соответствует оптимальной кривой с немного более высоким BER. Это происходит из-за того, что уменьшенное отсечение делает дисперсию полезного сигнала меньше в заданном динамическом диапазоне, но уменьшение шума отсечения меньше, чем фоновый системный шум. Показано, что отсечение при  $\pm 2,0\sigma$  создает более высокий шум отсечения, что приводит к более высокому значению BER. Используя оптимальный уровень ограничения, скорость передачи данных 1,81 Гбит/с была достигнута с BER  $1,2 \times 10^{-3}$ . Учитывая накладные расходы на упреждающую коррекцию ошибок (FEC) в размере 7% для безошибочной системы [11], скорость передачи данных становится равной 1,682 Гбит/с.

**К практической системе.** Для этой системы можно достичь больших расстояний, но при слишком низком уровне освещения, чтобы его можно было использовать для освещения. (Например, была измерена скорость 0,84 Гбит/с на расстоянии 2 м при освещенности 14 люкс.) Таким образом, основной задачей этого подхода является увеличение мощности, излучаемой источником белого света, чтобы обеспечить большой диапазон и/или покрытие. Кроме того, требуется более компактный излучатель.

Массивы  $\mu$ -светодиодов могут использоваться для увеличения общей передаваемой мощности при сохранении пропускной способности отдельных устройств, и этот подход реализуется в программе UPVLC (частью которой является это письмо). В типичной комнате будет несколько светодиодных светильников, распределенных по потолку, чтобы обеспечить освещение, и в этом случае каждый светильник будет состоять из массива микро-светодиодов. Чтобы создать более простой и компактный излучатель, мы используем решетки и микрооптические структуры на светодиодах для обеспечения направленного излучения [12].

Это снизит потребность в собирающей оптике с высокой числовой апертурой. Кроме того, с помощью прикрепленной пленки твердотельного преобразователя, или близко к массиву светодиодов находится под следствием. Твердопленочный преобразователь SY был протестирован и показал многообещающие результаты, несмотря на некоторые проблемы с инкапсуляцией, ограничивающие срок службы. Также исследуются другие сопряженные полимеры с более высоким PLQY (до 90%). Вместе эти подходы должны привести к практическим устройствам.

**Заключение.** В этом стае мы продемонстрировали возможность использования сопряженного полимера для VLC белого света. Наш новый подход позволил получить белый свет с широкой полосой модуляции.

Канал связи белого света со скоростью 1,68 Гбит/с был продемонстрирован на расстоянии 3 см с применением адаптивного метода DCO-OFDM.

Однако ограниченная мощность  $\mu$ LED и значительные вносимые потери преобразователя цвета (из-за его изотропной схемы переизлучения) приводят к тому, что уровень освещенности намного ниже (240 люкс), чем у коммерческого белого светодиода.

Однако таблица 1 показывает, что для заданного уровня освещенности описанный здесь «быстро-белый» светодиод может обеспечить значительную дополнительную мощность. Это самые быстрые результаты, о которых сообщалось для VLC с одним белым источником.

#### Список литературы:

1. Д. О'Брайен, Л. Зенг, Х. Ле-Мин, Г. Фолкнер, Дж. В. Валевски и С. Рандел, «Связь в видимом свете: проблемы и возможности», в Proc. IEEE 19-я международная Симп. PIMRC, сентябрь 2008 г., стр. 1–5.
2. AM Khalid, G. Cossu, R. Corsini, P. Choudhury и E. Ciaramella, «Передача со скоростью 1 Гбит/с через фосфоресцентный белый светодиод с использованием адаптивной дискретной многотональной модуляции», IEEE Photon. Дж., том. 4, нет. 5, стр. 1465–1473, октябрь 2012 г.
3. Л. Генг, Дж. Вей, Р. В. Пенти, И. Уайт и Д. Г. Каннингем, «Пластиковая волоконно-оптическая линия на основе светодиодов со ступенчатым индексом 3 Гбит/с с использованием многоуровневой амплитудно-импульсной модуляции», в Proc. IEEE опт. Волокно Комм. конф. Экспо. Нац. оптоволоконно англ. конф. (OFC/NFOEC), Анахайм, Калифорния, США, март 2013 г., стр. 1–3.
4. JJD McKendry и др., «Связь в видимом свете с использованием массива микросветоизлучающих диодов, управляемого CMOS», J. Lightw. Техн., вып. 30, нет. 1, стр. 61–67, 1 января 2012 г.
5. Д. Цонев и др., «Беспроводная линия VLC на основе OFDM с одним светодиодом 3 Гбит/с с использованием  $\mu$ LED из нитрида галлия», IEEE Photon. Технол. Лет., т. 26, нет. 7, стр. 637–640, 1 апреля 2014 г.
6. С. Р. Белтон и др., «Новый свет от гибридных неорганических и органических излучателей». Дж. Физ. Д, заявл. физ., вып. 41, нет. 9, с. 094006, 2008.
7. С. Гамбино, А.К. Бансал и И.Д.В. Самуэль, «Фотофизические и переносящие заряд свойства сополимера SuperYellow», Орган.Электрон., т. 1, с. 14, нет. 8, стр. 1980–1987, 2013.
8. АН Azhar, Т. Tran и D. O'Brien, «Беспроводная передача Gigabit/s в помещении с использованием связи видимого света MIMO-OFDM», IEEE Photon. Технол. Лет., т. 25, нет. 2, стр. 171–174, 15 января 2013 г.
9. С. Димитров и Х. Хаас, «Скорость передачи информации оптических систем беспроводной связи на основе OFDM с нелинейными искажениями», J. Lightw. Техн., вып. 31, нет. 6, стр. 918–929, 15 марта 2013 г.
10. HE Levin, "Полный и оптимальный метод распределения данных для практических дискретных многотональных систем", в Proc. IEEE Global Telecommun. конф. (IEEE GLOBECOM), том. 1. Сан-Антонио, Техас, США, ноябрь 2001 г., стр. 369–374.



11. Прямая коррекция ошибок для высокоскоростных подводных систем DWDM, документ ITU- T G.975.1, 2004 г.

12. J. Herrnsdorf и др., "Гибридный органический/GaN фотонный кристалл светоизлучающий диод", Appl. физ. Лет., т. 101, нет. 14, с. 141122, 2012.

### References

1. M. Hoa Le, D. O'Braien, G. Folkner, Z. Liýbin, L. Kěnvý, Dj. Daekwang, O. YunJe и W. Eun Tae, «Sviaz v vidimom svete NRZ so skorostý 100 Mbit / s s ispolzovaniem belogo svetodioda s postkorrektsie», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, str. 1063-1065, 2009.

2. JJD McKendry, D. Massoubre, S. Zhang, BR Rae, RP Green, E. Gý, R. K. Henderson, A. E. Kelli и M. D. Doýson, «Sviaz v vidimom svete s ispolzovaniem massiva mikrosvetoizlýcháyih diodov, ýpravliaemogo KMOP», Journal of Lightwave Technology, vol. 30, str. 61-67, 2012.

3. D. Tsonev, H. Chýn, S. Radjbandari, Dj. Makkendri, S. Videv, E. Gý, M. Hadji, S. Ýotson, A. Kelli, G. Folkner, M. Doýson, H. Haas и D. O'Braien, «Besprovodnaia linia VLC na osnove OFDM s odnim svetodiodom so skorostý 3 Gbit / s s ispolzovaniem µLED iz nitrida gallia», IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, str. 637-640, 2014.

4. A. Berton, M. Hoa Le, Z. Gassemoi, E. Bentli и K. Botella, «Eksperimentalnaia demonstratsia sviazi v vidimom svete so skorostý 50 Mbit/s s ispolzovaniem MIMO 4 na 4», Photonics Technology Letters, IEEE, ob. 26, str. 945-948, 2014.

5. AH Azhar, TA Tran и D. O'Brien, «Besprovodnaia peredacha Gigabit/s v pomeeni s ispolzovaniem sviazi vidimogo sveta MIMO-OFDM». IEEE Photonics Technology Letters, tom. 25, str. 171-174, 2013.

6. Z. Liýbin, D. O'Braien, M. Hoa, G. Folkner, L. Kěnvý, Dj. Dekvang, O. IýnDje и V. Yn Te, «Mnojestvennyy vvod-vyvod s vysokoi skorostý peredachi dannyh (MIMO) opticheskaia besprovodnaia sviaz s ispolzovaniem belogo svetodiodnogo osveeniya», IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27, str. 1654-1662, 2009.

7. T. Fat и H. Haas, «Sravnenie proizvoditelnosti metodov MIMO dlia opticheskoï besprovodnoï sviazi v pomeeniakh», IEEE Transactions on Communications, vol. 61, str. 733-742, 2013.

8. X. Fang, M. Khalighi и S. Bourennane, «Vlianie razlichnyh istochnikov shýma na harakteristiki priemnikov FSO na osnove PIN и APD», v Telekommýnikatsii (ConTEL), Materialy 11-ï Mejdýnarodnoï konferentsii, str. 211-218. 2011.

9. S. Dimitrov и H. Haas, «Skorost peredachi informatsii opticheskikh sistem besprovodnoï sviazi na osnove OFDM s nelineinymi iskajeniiami», J. Lightw. Tehn., vyp. 31, net. 6, str. 918-929, 15 marta 2013 g.

10. HE Levin, "Polnyi и optimalnyi metod raspredeleniia dannyh dlia prakticheskikh diskretnykh mnogotonalnykh sistem", v Proc. IEEE Global Telecommun. konf. (IEEE GLOBECOM), tom. 1. San-Antonio, Tehas, SShA, noiabr 2001 g., str. 369-374.

11. Priamaia korrektsiia oshibok dlia vysokoskorostnykh podvodnykh sistem DWDM, dokýment ITU- T G.975.1, 2004.

12. J. Herrnsdorf и др., "Gibridnyi organicheskii/GaN fotonnyi kristall svetozlýcháyui diod", Appl. fiz. Let., t. 101, net. 14, s. 141122, 2012.

Материал поступил в редакцию 3.11.2022 г.