

Система интеллектуального освещения и передачи данных на основе *RGBW*-светодиодов

*Д.С. ШИРЯЕВ¹, О.А. КОЗЫРЕВА¹, И.С. ПОЛУХИН¹, С.А. ЩЕГЛОВ¹, С.А. ДЕГТЯРЁВА¹, М.А. ОДНОБЛЮДОВ², В.Е. БУГРОВ¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург

² СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург

E-mail: 192167@niuitmo.ru*

Аннотация

Разработана и изготовлена система интеллектуального освещения, производящая передачу данных по видимому излучению. Исследованы спектральные характеристики нисходящего канала связи, в котором для передачи данных использован красный кристалл *RGBW*-светодиода. Разработана схема управления цветностью излучения с использованием протокола *DALI*, которая позволяет задавать разные сценарии освещения при сохранении скорости передачи данных. Область изменения цветности излучения охватывает практически всю гамму цветов в цветовом пространстве. Для создания системы разработана схема ВЧ согласования импедансов компонентов системы и исследованы частотные характеристики предложенной схемы. Определены оптимальные параметры сигнала для передачи данных по видимому излучению: несущая частота, тип и полоса модуляции. В качестве метода исследования качества канала передачи выбрано наблюдение сигнальных созвездий, являющихся представлением всевозможных значений комплексной амплитуды манипулированного сигнала в виде комплексного числа на плоскости квадратур (косинусной и синусной составляющих несущего сигнала) и фиксации амплитуды вектора ошибки *EVM*. В канале передачи по видимому свету для сигнала с амплитудной модуляцией значение *EVM* было существенно ниже, чем для фазоманипулированных сигналов. При реализации разных сценариев изменения освещения излучение остальных, не задействованных в передаче, кристаллов светодиода не приводило к увеличению *EVM* более чем на один процент.

Ключевые слова: оптические беспроводные системы связи, беспроводная связь по видимому свету, *Li-Fi*, *RGBW*-светодиод, адаптивное освещение, человекоориентированное освещение (*HCL*), протокол *DALI*.

Введение

В настоящее время большое развитие получают системы «умный дом», в которых множество датчиков автоматизированно создаёт комфортные условия для человека. Одновременно эти системы нацелены на использование одного ресурса для реализации нескольких сервисов. В связи с этим известна технология *Li-Fi* (*Light Fidelity*) [1, 2], в которой предложено использовать освещение СД источниками излучения для передачи данных. В этой технологии СД, как люминофорные, так и *RGBW*, модулируются ВЧ информационным сигналом; при этом изменение светового потока не ощущается человеческим глазом, но хорошо детектируется чувствительными быстродействующими фотоприёмниками. Одновременно возникает возможность создания специального, комфортного для человека освещения, например, в соответствии с концепцией человекоориентированного освещения (*Human Centric Lighting*, *HCL*), в рамках которой можно создавать сценарии управления уровнем и цветностью излучения.

Традиционно, в *Li-Fi* системах на основе *RGBW*-СД, используют мультиплексирование по длине волны для увеличения общей скорости при параллельной передаче данных [3–6]. При этом ставят задачи по получению скоростей передачи выше 1 Гбит/с и (или) расстояний передачи данных в десятки метров [7, 8], но не уделяют внимания вопросам качества освещения. Также существуют системы с воз-

можностью управления цветностью излучения по протоколу *DALI*, но они не предполагают передачи данных по видимому каналу.

В настоящей работе нами предложена и разработана система освещения с использованием *RGBW*-СД с функцией дуплексной передачи данных. Основной целью работы являлась организация стабильного дуплексного канала связи со скоростями передачи, сопоставимыми с тем же в *Wi-Fi*, при реализации сценария изменения цветности излучения с управлением по протоколу *DALI*. В соответствии с этим решались задачи по разработке оригинальной схемы СД передатчика и исследованию видов сигналов, оптимальных для передачи по созданному каналу с точки зрения минимума ошибок.

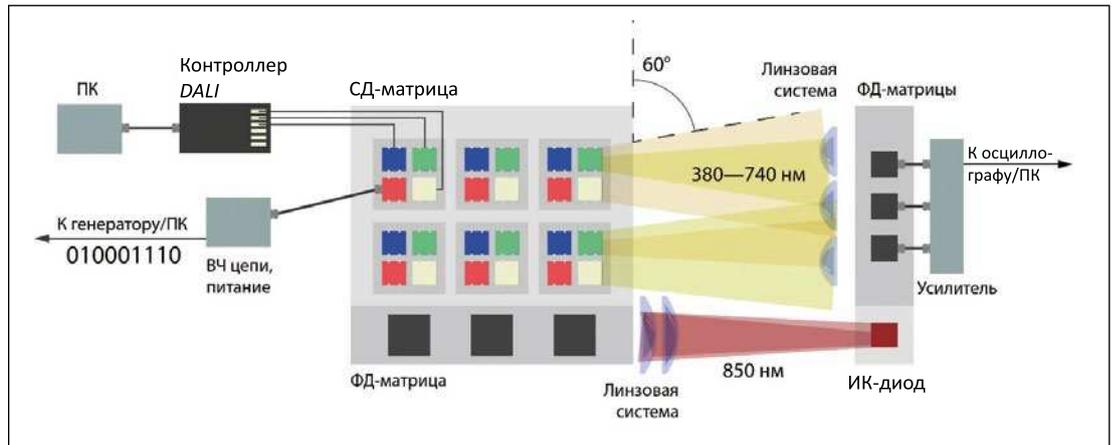
Описание системы

Для достижения поставленной цели предложены и реализованы СД приёмопередатчик и клиентское приёмопередаточное устройство на коммерчески доступной компонентной базе (рис. 1). Передающая часть СД приёмопередатчика – это матрица *RGBW*-СД, в которой красный кристалл подключается к разработанным ВЧ цепям согласования и подачи смещения, а остальные кристаллы подключаются к контроллеру *DALI*. Приёмная часть состоит из матрицы ИК фотодиодов с линзовой системой. Модулированный свет от матрицы *RGBW*-СД через свободное пространство поступает на матрицу фотоприёмников клиентского приёмопередаточного устройства, где сигнал суммируется и усиливается для последующей обработки.

Нисходящая линия связи построена на модуляции излучения красного кристалла СД, а восходящая – излучения ИК диода с пиковой длиной волны 850 нм. Восходящая линия связи в данной работе не рассматривалась, а в качестве неё была использована линия из нашей предыдущей работы [9].

Выбор компонентной базы для передающей (СД) и приёмной (фотодиодной) частей определяется быстродействием оптоэлектронных компонентов. Так, для передачи информации с канальной скоростью, сопоставимой со скоростями в *Wi-Fi*, необходимо иметь полосу пропускания СД и фотоприёмников не менее 40 МГц. В ка-

Рис. 1. Упрощённая структурная схема светодиодного приёмопередатчика и клиентского приёмопередающего устройства



честве источника видимого излучения были использованы *RGBW-СД Cree XLamp MCE*, а в качестве приёмника – кремниевые фотодиоды *Thorlabs FDS100*; такой выбор обусловлен малыми значениями паразитных емкостей компонентов: 70 и 25 пФ соответственно. Предельная частота модуляции f может оцениваться по формуле

$$f \approx \frac{1}{2\pi RC},$$

где R – сопротивление нагрузки, в данном случае ВЧ тракта; C – значение паразитной ёмкости компонента. Расчётные значения этой частоты – 45 МГц для СД и 127 МГц для фотодиода.

Модуляция сигнала СД производится вблизи рабочей точки, т.е. не происходит полного выключения-включения СД, а изменяется уровень светового потока до 30 % от номинального значения.

ВЧ сигнал на все красные кристаллы СД в матрице подаётся синфазно, а импеданс красного кристалла каждого СД согласован с импедансом ВЧ-тракта (для обеспечения эффективной передачи ВЧ мощности от модулятора). Расчётная кривая коэффициента отражения единичного кристалла и измеренная показаны на рис. 2. Схемы согласования импедансов, постоянного смещения и усиления построены на сосредоточенных пассивных компонентах и реализованы в гибридном интегральном исполнении. СД приёмопередатчик и клиентское приёмопередающее устройство имеют коаксиальные радиочастотные вход и выход для подачи и снятия ВЧ сигнала.

Выбор красного кристалла для передачи данных обусловлен спектральными характеристиками компонентов: чувствительность фотоприёмни-

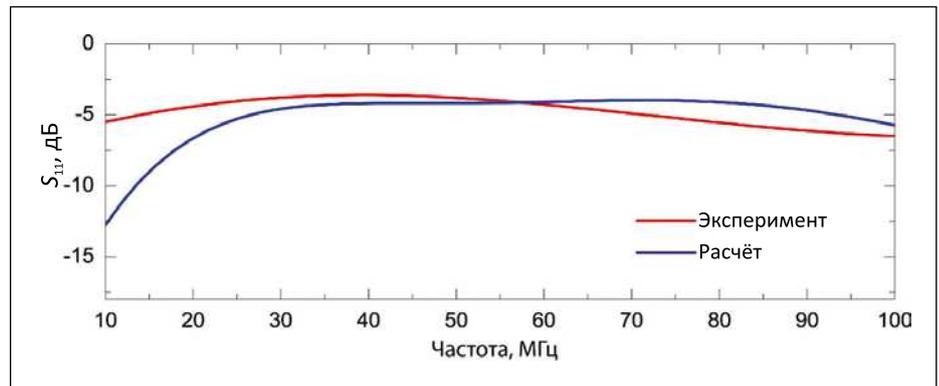


Рис. 2. Расчётная и измеренная кривые коэффициента отражения ВЧ сигнала от красного кристалла светодиода S_{11}

Рис. 3. Спектральная чувствительность фотоприёмника и спектр излучения RGBW-светодиода

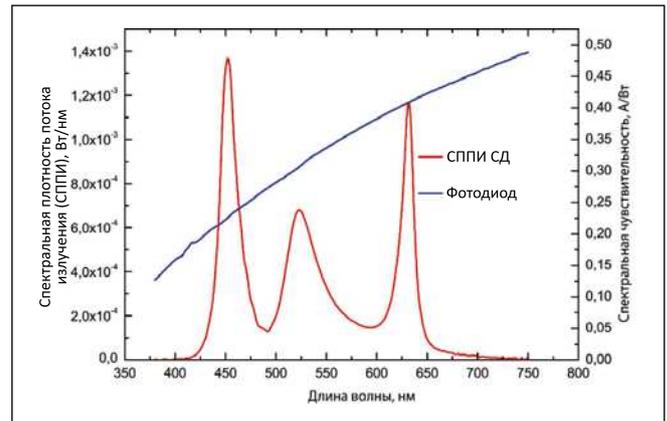


Рис. 4. Фото излучающей светодиодной матрицы на разных стадиях сценария освещения. Точками на цветовом графике МКО 1976 г. отмечены соответствующие $T_{кц}$ измеренные спектрометром *UPRtek MK350S*

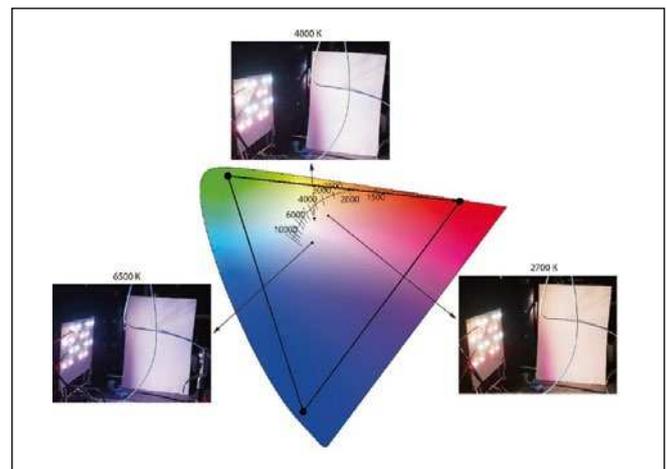
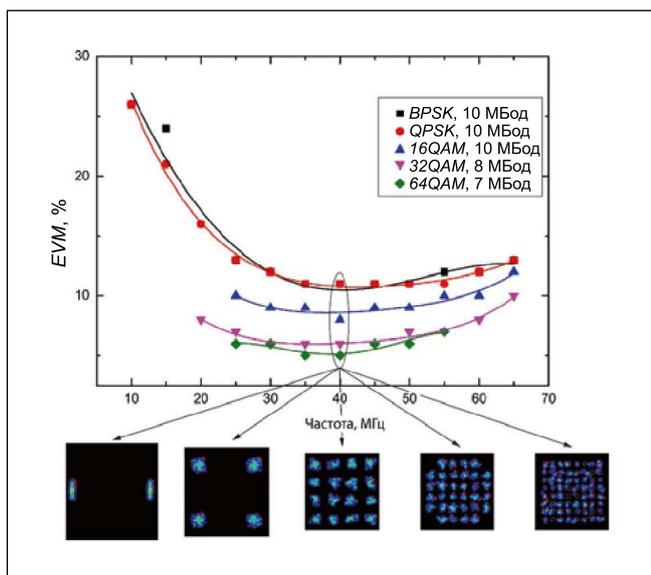


Рис. 5. Зависимости вектора ошибки сигнала EVM от несущей частоты сигнала от красного кристалла светодиода



ка в красной части спектра в полтора раза выше, чем в синей. По расчётам, энергетический выигрыш от более высокой фоточувствительности на приёмной стороне больше, чем от более высокого уровня излучения синего кристалла на передающей стороне. На рис. 3 показаны спектр излучения белого $RGBW$ -СД с коррелированной цветовой температурой $T_{кц}$ около 10000 К и кривая спектральной чувствительности фотодиода $FDS100$.

В итоговой конфигурации разработанный приёмопередатчик имеет матрицу из 16 $RGBW$ -СД, а в клиентском устройстве сигнал регистрируется матрицей из 4 фотоприёмников.

Сценарии освещения

Концепция HCL подразумевает подстройку параметров освещения под биологические потребности человека. Предлагаемая система передачи данных позволяет изменять цветность излучения практически во всём цветовом пространстве, что позволяет задавать различные сценарии для освещения в помещениях.

Исследования показывают, что для хорошего самочувствия и продуктивной работы, изменение искусственного освещения в течение дня должно быть максимально близко к изменению естественного [10]. Так, $T_{кц}$ источников излучения должна плавно повышаться от 2700 К рано утром до 6500 К в полдень и снова плавно понижаться до 2700 К к концу рабочего дня. На рис. 4 показаны фотографии передающего модуля с $T_{кц}$ 6500, 4000 и 2700 К и область возможного изме-

нения цветности источников излучения на цветовом графике МКО 1976 г. (обозначена чёрным треугольником, в вершинах которого указаны цветовые координаты каждого кристалла СД). Это один из сценариев, реализуемых в разработанной системе при сохранении стабильного канала передачи данных.

Разработанный СД приёмо-передатчик позволяет создавать освещённость на рабочем месте, расположенном на расстоянии 1,5–2 м от СД матрицы, до 450 лк.

Экспериментальное исследование канала связи

Для оценки передаточных характеристик созданного канала связи рассматривались сигнальные созвездия разных видов модуляции сигналов, по которым можно определять амплитуду вектора ошибки и типы шумов, воздействующих на канал связи. Для получения сигнальных созвездий и определения зависимости амплитуды вектора ошибки EVM от несущей частоты сигнала с генератора сигналов произвольной формы $Keysight M8195A$ на СД приёмопередатчик подавалась псевдослучайная последовательность $PRBS27-1$, а сигнал с клиентского приёмопередатчика наблюдался на осциллографе $Keysight UXR0204A$.

На незадействованные в передаче данных кристаллы подавалось напряжение смещения с контроллера $DALI$, подключённого к ПК, на котором задавались сценарии освещения (рис. 1).

На рис. 5 приведены графики зависимости амплитуды вектора ошибки

от несущей частоты сигнала при разных типах модуляции: двоичная фазовая манипуляция $BPSK$, квадратурная фазовая манипуляция $QPSK$, 16-позиционная квадратурная модуляция $16QAM$, 32-позиционная квадратурная модуляция $32QAM$ и 64-позиционная квадратурная модуляция $64QAM$. Все измерения проведены при фиксированной амплитуде модулирующего сигнала.

При несущей частоте сигнала вблизи 40 МГц наблюдается минимум EVM по всем исследованным типам модуляции. Были исследованы сигналы с полосой модуляции 10 МГц и, соответственно, символьной скоростью 10 МБод. Как видно из рис. 5, при использовании фазовых манипуляций амплитуда EVM выше, чем при использовании квадратурной амплитудной модуляции. Так как при изменении фазы сигнала фотоприёмник регистрирует изменение уровня излучения, сравнимое с уровнем шумов, возникают фазовые помехи. Это видно и из сигнального созвездия $BPSK$ сигнала, так как искажение точек в ячейках создаёт визуальный эффект сферической симметрии относительно центра созвездия [11], что свидетельствует о наличии фазового сдвига сигнала или же фазового дрожания.

Далее были исследованы характеристики сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией разной позиционности. Из сигнальных созвездий QAM сигналов видно, что возникает разброс точек диаграммы вокруг соответствующих им позиций, что показывает воздействие на канал связи аддитивного белого гауссова шума [11]. В связи с этим сужение полосы сигнала может уменьшать число ошибок, но для сохранения битовой скорости необходимо увеличивать число бит на символ: с 4 до 6 (переход от $16QAM$ к $64QAM$). Так, значение EVM снизилось до 5 % без потери битовой скорости при модулировании сигнала модуляцией $64QAM$ с несущей частотой 40 МГц и символьной скоростью 7 МБод.

В таблице показаны значения амплитуды вектора ошибки в режиме включения только красного кристалла и в режиме реализации сценария HCL – излучают все кристаллы. Качество передачи данных не меняется при работе всех кристаллов СД, что позволяет использовать предложен-

**Вектор ошибки сигнала для разных модуляций
(частота несущей сигнала – 40 МГц)**

Вид модуляции	<i>EVM</i> , % Только передача на красном кристалле	<i>EVM</i> , % Передача с одновременной реализацией сценариев <i>HCL</i>
<i>BPSK</i>	11	12
<i>QPSK</i>	11	11
<i>16QAM</i>	8	9
<i>32QAM</i>	6	6
<i>64QAM</i>	5	6

ную схему для передачи данных и одновременно управлять цветностью излучения в помещении.

Исследование рассмотренных выше типов сигналов во многом обусловлено планами по дальнейшей интеграции системы. Ранее [9] мы создали схемы преобразования сигнала, позволяющие переносить сигнал непосредственно с *Wi-Fi* модема на СД матрицу. Для реализованного канала на *RGBW*-СД при подключении к ПК через *Wi-Fi* модем и разработанные схемы преобразования сигнала мы получили (регистрировали) скорость и расстояние передачи в 24 Мбит/с и 2 м соответственно.

Заключение

Разработаны и изготовлены модули, позволяющие передавать данные по видимому излучению и одновременно реализовывать произвольные сценарии освещения, охватывающие почти всю цветовую гамму цветового пространства, изменяя цветность излучения по протоколу *DALI*. Световой канал показал свою схожесть с моделью радиочастотного канала с аддитивным белым гауссовым шумом, но только для амплитудных типов модуляций. Для фазовых манипуляций принцип работы полупроводниковых фотоприёмников создаёт дополнительные фазовые искажения на приёмной стороне. При передаче по видимому излучению напрямую радиочастотных сигналов целесообразно уменьшать полосу сигнала – при сохранении битовой скорости для уменьшения уровня шумов – путём увеличения количества бит на символ.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haas H., Yin L., Wang Y., Chen C. What is Li-Fi? // *Journal of Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34. – P. 1533–1544.
2. Rajbhandari S., McKendry J.J.D., Herrnsdorf J. et al. A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications // *Semiconductor Science and Technology*. – 2017. – Vol. 32, No. 2. – P. 1–40.
3. Wang Y., Wang Y., Chi N., Yu J., Shang H. Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 1203–1208.
4. Cossu G., A.M. Khalid A.M., Choudhury P., Corsini R., Ciaramella E. 3.4-Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. B501–B506.
5. Wu F.M., Lin C.T., Wei C.C., Chen C.W., Chen Z.Y., Huang H.T. 3.22-Gb/s WDM visible light communication of a single RGB LED employing carrier-less amplitude and phase modulation / *OFC Conference*. – 2013. – P. 1–3.

6. Wu F.M., Lin C.T., Wei C.C., Chen C.W., Chen Z.Y., Huang H.T., Chi S. Performance Comparison of OFDM Signal and CAP Signal Over High Capacity RGB-LED-Based WDM Visible Light Communication // *IEEE Photonics Journal*. – 2013. – Vol. 5, Is. 4.

7. Chow C.W., Shiu R.J., Liu Y.C., Liu Y., Yeh C.H. Non-flickering 100 m RGB visible light communication transmission based on a CMOS image sensor // *Opt. Express* – 2018. – Vol. 26. – P. 7079–7084.

8. Atta M.A., Bermak A. 160 m visible light communication link using hybrid undersampled phase-frequency shift on-off keying and CMOS image sensor // *Opt. Express*. – 2019. – Vol. 27. – P. 2478–2487.

9. Kozyreva O.A., Polukhin I.S., Shiryayev D.S., Shcheglov S.A., Borodkin A.I., Gareev E.Z., Kondakov D.V., Matveev Y.A., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E. Wireless local data transmission network through LED lighting compatible with IEEE802.11 protocol communication systems // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1236, No. 1. – P. 012085.

10. Walerczyk S. Human Centric Lighting // *Architectural SSL*. – 2012. – No. 6. – P. 20–26.

11. Львов А.А., Киселёв В.В. Численное моделирование и анализ воздействия искажений на ofdm/qam-сигнал // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика*. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 104–110.



Ширяев Даниил Сергеевич, аспирант. Окончил в 2020 г. магистратуру факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО. Инженер Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО



Козырева Ольга Андреевна, аспирант. Окончила в 2016 г. магистратуру СПбПУ Петра Великого. Научный сотрудник Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО



Полухин Иван Сергеевич, аспирант. Окончил в 2009 г. магистратуру СПбПУ Петра Великого. Директор Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО



Щеглов Сергей Александрович, инженер. Окончил в 2006 г. кафедру прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. Зав.

светотехнической лабораторией факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО



Дегтярёва Светлана Андреевна, аспирант. Окончила в 2018 г. Университет ИТМО по программе магистратуры «Световой дизайн». Научный сотрудник Лаборатории атмосферных оптических квантовых каналов связи Университета ИТМО

светотехнической лабораторией факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО



Однооблюдов Максим Анатольевич, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1996 г. кафедру оптоэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ульянова (Ленина). Директор Объединённого научно-технологического института и зав. лабораторией «Лазерные и плазменные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого

и зав. лабораторией «Лазерные и плазменные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) Петра Великого



Бугров Владислав Евгеньевич, доктор физ.-мат. наук, профессор. Окончил в 1996 г. кафедру оптоэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета имени В.И. Ульянова (Ленина). Директор мегафакультета фотоники и профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО

Директор мегафакультета фотоники и профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники Университета ИТМО

Инженер Ли Минджу (Ларри) из Университета Иллинойса объявил о прорыве в разработке многослойных солнечных элементов. Команда исследователей под его руководством создала новый тандемный элемент, который может увеличить выработку электроэнергии солнечными панелями на 50 %.

«Кремниевые солнечные панели широко распространены, так как они дешёвы и могут преобразовывать чуть более 20 % солнечного излучения в полезную электроэнергию. Однако, как и кремниевые компьютерные микросхемы, кремниевые солнечные элементы достигают предела своих возможностей, поэтому поиск новых способов повышения их эффективности может быть привлекателен для поставщиков и потребителей энергии», – объясняет Ли.

С целью расширить возможности традиционных солнечных панелей, команда разработала новый полупроводниковый материал на основе фосфида арсенида галлия, который дополняет характеристики кремния. Оба материала поглощают видимый свет, но фосфид арсенида галлия делает это, выделяя меньше тепла. В то же время кремний выигрывает у фосфида в преобразовании энергии из ИК части солнечного спектра. Более того, в отличие от обычных солнечных панелей, гибридные элементы значительно лучше за-

щищены от дефектов, возникающих со временем.



Фань Шичжао, один из участников исследования, разработал новый процесс формирования границ раздела в ячейке из фосфида арсенида галлия, что привело к значительным улучшениям в стабильности новых элементов. В результате команда получила защищённые солнечные панели, которые вырабатывают в 1,5 раза больше электроэнергии, чем широко используемые кремниевые.

Повышение выработки сразу на 50 % – это гигантский прорыв, который может привести к дальнейшему снижению стоимости выработки энергии солнечными панелями.

При этом важно отметить, что несмотря на эффективность и стабильность, фосфид арсенида галлия и другие подобные ему полупроводниковые материалы заметно дороже в производстве однослойных панелей из кремния. Но учёные не стали отказываться от перспективного материала, а сэкономили на кремнии, используя его самые дешёвые варианты. В результате стоимость промышленного производства новой панели не должна сильно вырасти.

hightech.plus
11.10.2020

Письмо читателя

Опечатка в № 5 «Светотехники» за 2020 год

«Уважаемые коллеги!

Прочитал статью «Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами». На с. 13 п. 2 журнала указано: «На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения на максимуме напряжения (а) и в зоне перехода через 0 (б)». На мой взгляд, произошла ошибка, а именно, рисунки с индексами (а) и (б) перепутаны. В результате рисунки, предназначенные для пояснения текста, по факту находятся в полном противоречии с ним

С уважением, пожеланиями здоровья и успехов, читатель журнала В.В. Бармин».

Ответ редакции

Действительно, в статье «Методика измерения пусковых токов в осветительных приборах со светодиодами» допущена опечатка. В п. 2 на с. 13 вместо «На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения на максимуме напряжения (а) и в зоне перехода через 0 (б)» следует читать:

«На рис. 6 демонстрируется существенная разница амплитуд пусковых токов для включения в зоне перехода напряжения через 0 (а) на максимуме напряжения (б)».

Редакция приносит свои извинения за допущенную ошибку и благодарит читателя за его внимательность и внимание к статьям, публикуемым в нашем журнале!

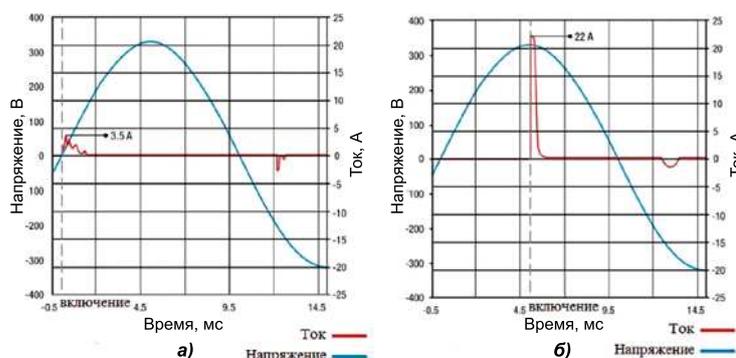


Рис. 6. Различия амплитудных значений пусковых токов в зависимости от момента включения