



УДК 621.38  
ГРНТИ 49.27.01

## БЕСПРОВОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СВЯЗИ LI-FI НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

*А.Г. КОШЕЛЕВ, кандидат технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Д.В. РОДИОНОВ  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
М.П. БЕЛЯЕВ, кандидат технических наук  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье приведено обоснование перспективности применения многоканальных органических светоизлучающих диодов в беспроводной передаче данных сети Li-Fi на основе анализа их основных свойств и характеристик, обеспечивающего сверхскоростную передачу данных, высокую помехозащищенность и низкое энергопотребление.

*Ключевые слова:* беспроводная передача данных, многоканальный органический светоизлучающий диод, фотоприемник, сеть, модуляция.

## WIRELESS COMMUNICATION TECHNOLOGY LI-FI BASED ON MULTI-CHANNEL ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODE

*A.G. KOSHELEV, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
D.V. RODIONOV  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
M.P. BELYAEV, Candidate of Technical Sciences  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article substantiates the prospects of using multichannel organic light-emitting diodes in wireless data transmission of Li-Fi network based on the analysis of their basic properties and characteristics, providing ultra-fast data transmission, high noise immunity and low power consumption.

*Keywords:* wireless data transmission, multichannel organic light-emitting diode, photodetector, network, modulation.

**Введение.** Использование радиоволн для передачи данных в беспроводных сетях, включая Wi-Fi [1], имеет ряд существенных недостатков, к которым следует отнести:

- низкую скорость передачи данных и высокий уровень радиопомех, вызванных всевозрастающим количеством работающих роутеров (маршрутизаторов);
- повышение количества потребляемой энергии за счет использования в мире более миллиона сотовых радиостанций, потребляющих огромное количество энергии. Причем, большая часть этой энергии используется не для передачи информации, а для охлаждения этих станций. Поэтому эффективность таких радиостанций составляет всего лишь 5 % [2];
- запрет, в целях безопасности, использования мобильных телефонов и других систем радиосвязи в самолётах, нефтехимических предприятиях, заправочных станциях и больницах. К примеру, использование их на борту воздушного судна создает электромагнитные помехи,



вызывающие сбои в работе навигационного оборудования самолёта, а также вносит искажения в работу наземных сетей.

Исследования последних лет, проводимые учеными в области создания новых эффективных беспроводных сетей передачи информации, показали перспективу использования спектра видимого диапазона электромагнитных волн, лежащего в пределах 380–760 нм. Результатом таких исследований и явилась беспроводная сеть передачи данных в видимом диапазоне электромагнитных волн – Li-Fi.

**Актуальность.** Light Fidelity (Li-Fi) – это новая парадигма, которая является продолжением тенденции перехода к более высокочастотному спектру в области беспроводной связи внутри помещений. Концепцией этой технологии является то, что информация может быть передана с помощью светоизлучающих диодов, а скорость передачи данных можно контролировать с помощью интенсивности излучения диодов, которая меняется быстрее, восприятия интенсивности света человеческим глазом. Система Li-Fi является двунаправленной многопользовательской (многоточечной) системой связи. В системе Li-Fi скорость передачи данных зависит от технических возможностей светоизлучающих диодов, например скорости включения-выключения и количества светодиодов. Скорость передачи данных обратно пропорциональна размеру светодиода, что означает, что чем меньше размер светодиода, тем выше скорость передачи данных. Увеличение числа светоизлучающих диодов, обеспечивает возможность передачи данных большего объема в единицу времени, а также одновременно выполнять функцию освещения, в зависимости от требований внутренней коммуникационной модели.

Основным недостатком сети Li-Fi является требование по обеспечению прямой видимости связи, дальность которой ограничивается яркостью излучения диодов и чувствительностью фотоприемника.

Однако достоинства беспроводной связи в диапазоне видимого света, такие как:

- информационная безопасность;
- высокая пропускная способность;
- безопасность эксплуатации;
- простота и дешевизна реализации;
- отсутствие электромагнитного поля,

выводят данный вид связи на новый перспективный уровень организации информационных сетей.

На рисунке 1 представлена упрощенная структурная схема беспроводной передачи данных сети Li-Fi, содержащей:

- светоизлучающий диод, либо светодиодные панели;
- роутер (маршрутизатор), интегрированный в устройства освещения;
- фотоприемник, оснащенный декодером светового потока.

Информация, исходящая от Интернета, либо от сервера (компьютера, способного оказывать некоторые услуги другим компьютерам), в виде цифровых сигналов (данных) подается на вход светового драйвера (микропроцессора), в свою очередь, подключенного к источнику электропитания.

Включая и выключая источник электропитания СИД, с помощью светового драйвера, происходит высокочастотная модуляция. Возможности зрительного аппарата человека исключают восприятие мерцания диодов, а модуляционные методы передачи информации обеспечивают скорость до 10 Гбит в секунду. Фотоприемник с детектором обеспечивают регистрацию и преобразование светового потока в электрический сигнал, который в свою очередь расшифровывается в цифровые данные.

Информационная безопасность передаваемых данных обеспечивается исключением возможности перехвата в ограниченном помещении за счет недостатка Li-Fi в необходимости прямой видимости при организации связи, что является преимуществом перед радиочастотными сетями связи.

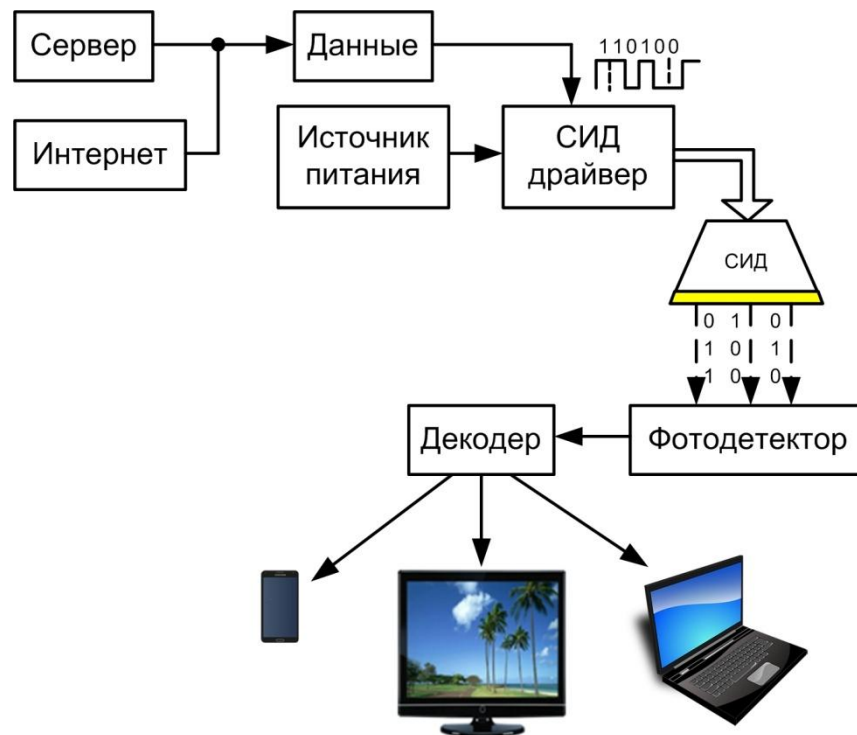


Рисунок 1 – Упрощенная структурная схема беспроводной сети Li-Fi

Требованиями к компонентам сети Li-Fi являются:

- высокая яркость излучения СИД;
- высокая чувствительность приемных фотодиодов;
- высокая скорость переключения СИД.

Одним из методов увеличения скорости передачи является метод, основанный на мультиплексировании данных, передаваемых на частотах красного (R), зелёного (G), синего (B) цветов, которые в совокупности образуют белый свет, согласно колориметрическому уравнению:

$$Y = 0.3R + 0.57G + 0.11B. \quad (1)$$

Одной из проблем при создании массивов из неорганических светодиодов, обеспечивающих, как скорость передачи данных, так и освещение, является сложность и дороговизна их изготовления, обусловленная хрупкостью кристаллов неорганических светодиодов, которые образуются с использованием общих методов эпитаксиального роста [3].

Исследования, проводимые в области создания органических светоизлучающих диодов (ОСИД), показали перспективность их применения в сети Li-Fi в качестве источника передаваемых данных. Это связано с тем, что органические полупроводники представляют собой растворимые материалы, обеспечивающие их чрезвычайно дешевое изготовление с использованием струйного принтера, рулонного или распылительного метода.

Целью данной работы является обоснование перспективности применения многоканальных ОСИД в беспроводной передаче данных сети Li-Fi на основе анализа их основных свойств и характеристик.

Для лучшего понимания данной работы по использованию ОСИД в сети Li-Fi, проведем краткий анализ особенностей его конструкции, принципа работы и основных характеристик.

ОСИД являются новым источником света с исключительными свойствами. ОСИД основаны на органических полупроводниках с системой сопряженных электронов, в настоящее время также исследуются возможности применения в других электронных и оптоэлектронных устройствах, таких как органические солнечные элементы и недорогие электронные схемы. Пер-



выми продуктами, которые появились на рынке, являются плоские дисплеи на основе органических светодиодов, обладающих высокой яркостью, малой толщиной, инвариантностью к углу обзора и быстрым откликом. В частности, ОСИД также имеют очень высокую эффективность при более высокой яркости. Потенциально они способны сократить потребление электроэнергии на 50 %.

Например, дисплеи, выполненные на основе ОСИД-технологии, показали, что по сравнению с жидкокристаллическими аналогами они обладают рядом преимуществ, а именно:

- малой толщиной экрана (излучение без подсветки);
- низким энергопотреблением;
- высоким быстродействием (~10 мкс);
- большой яркостью и эффективной цветопередачей;
- высокой контрастностью (> 5000:1);
- низкотемпературные условия эксплуатации;
- относительно простой технологией изготовления;
- относительно низкой стоимостью.

Пластиковые органические слои ОСИД тоньше, легче и более гибкие, чем кристаллические слои в СИД. Поскольку светоизлучающие слои ОСИД более светлые, подложка ОСИД может быть гибкой, а не жесткой. Поскольку органические слои ОСИД намного тоньше, чем соответствующие слои неорганических кристаллов СИД, проводящий и излучающий слои ОСИД могут быть многослойными. Поскольку ОСИД не требуют подсветки, они потребляют гораздо меньше энергии. Это особенно важно для устройств с батарейным питанием, таких как сотовые телефоны. Поскольку светодиоды в основном пластмассовые, их можно реализовать в больших тонких листах.

На рисунке 2 представлена упрощенная схема типичной ОСИД-структуры, состоящей из следующих слоев:

- прозрачного слоя анода, положительно заряженный электрод (притягивает электроны или анионы);
- нескольких полупроводниковых органических слоёв;
- катодного слоя, отрицательно заряженный электрод (притягивает катионы).

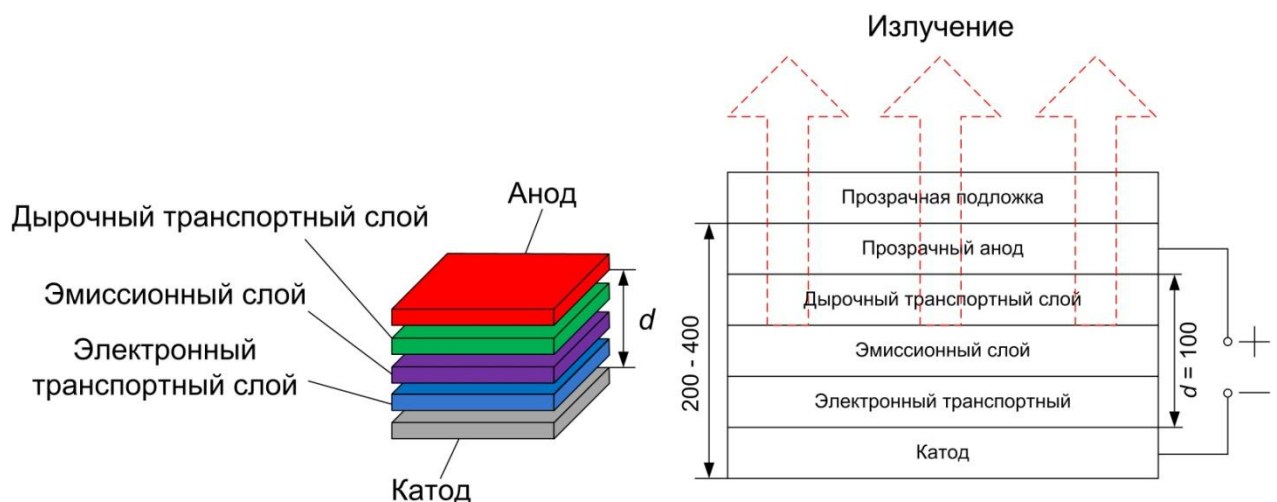


Рисунок 2 – Схема и принцип работы типичной ОСИД-структуры

Каждый органический слой имеет толщину от 10 до 100 нм, а электроды – от 15 до 150 нм.



Кроме того, ОСИД являются источниками Ламберта, т.е. обладают одинаковой яркостью во всех направлениях с силой света определяемой, как:

$$I = I_0 \cos \theta, \tag{2}$$

где  $I_0$  – сила света к надиру,  $\theta$  – эмиссионный угол (радиан) (рисунок 3).

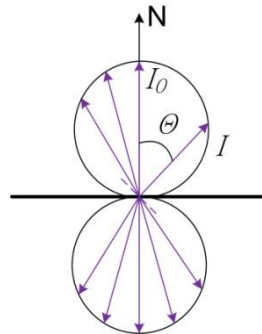


Рисунок 3 – Диаграмма излучения света с эмиссионного слоя ОСИД

Для расчета некоторых основных характеристик ОСИД, представим его в виде конденсатора  $C$  входящего в состав фильтра нижних частот (рисунок 4) с частотой среза:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC^2}, \tag{3}$$

где  $R$  – эффективное сопротивление ОСИД. Емкость конденсатора  $C$  определяется по формуле:

$$C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{d}, \tag{4}$$

где  $A$  – фотоактивная (излучаемая) поверхность эмиссионного слоя светодиода,  $d$  – толщина полимерных слоев между катодом и анодом,  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_r$ , соответственно, диэлектрическая проницаемость свободного пространства и относительная диэлектрическая проницаемость органического слоя.

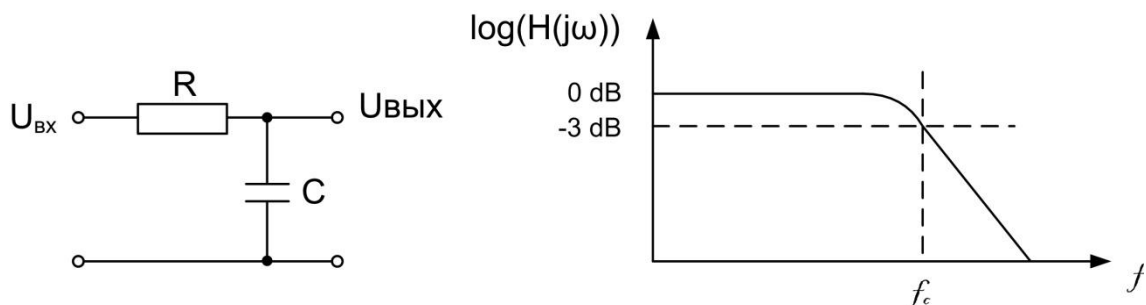


Рисунок 4 – Фильтр нижних частот (ФНЧ) и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ОСИД

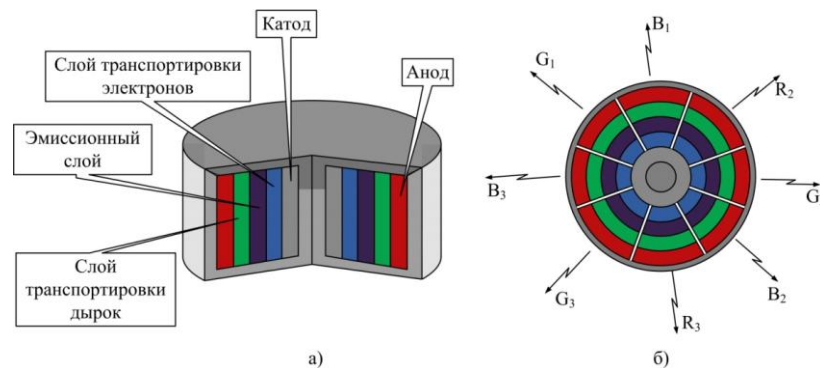
Из (3) и (4) следует, что область устройства обратно пропорциональна  $f_c$ . Для повышения яркости ОСИД желательно иметь большую фотоактивную (светоизлучающую) поверхность эмиссионного слоя и полосу пропускания одновременно, но это представляет собой серьезную



проблему для ОСИД-VLC. Например, для ОСИД с  $BW > 60$  МГц была создана поверхность [4] площадью  $A = 0,018$  мм<sup>2</sup>, что явно слишком малая для освещения типичного помещения. Таким образом, существует потребность в решении данной проблемы, если ОСИД-VLC следует принять как новую технологию для освещения и передачи данных.

ОСИД работает следующим образом. ОСИД имеет излучающий электролюминесцентный слой пленки, состоящий из органических молекул. Свет излучается, когда электрический ток проходит через органические молекулы. Электрическая энергия распространяется от катодного слоя, через органический материал (излучающий и проводящий слой) к анодному слою. Ток отдает электроны излучающему слою и удаляет электроны из проводящего слоя. Удаление электронов оставляет дыры в проводящем слое, которые необходимо повторно заполнить электронами. Для рекомбинации с электронами дырки перепрыгивают с проводящего слоя на заполненный электронами эмиссионный слой. В результате заполнения дырок высвобождается дополнительная энергия, которая производит яркий электролюминесцентный свет.

С целью расширения информационных и функциональных возможностей ОСИД-устройств, авторами данной работы предлагается объемный многоканальный светоизлучающий RGB-диод (МОСИД) или многоканальный воксел [5], упрощенная конструкция которого представлена на рисунке 5.



а) - вид сбоку, б) - вид сверху

Рисунок 5 – Упрощенная конструкция многоканального органического RGB-воксела в разрезе

МОСИД состоит из базовой прозрачной подложки, конструктивно содержащей вакуумно встроенные светопрозрачные электроды и межэлектродные слои органических структур. Органический слой синтезирован из светопрозрачного слоя перебрасывания дырок, фотоэмиссионного слоя, содержащего органические компоненты для генерирования красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов светового потока, а также слой перебрасывания электронов. Структурные слои органических компонентов синтезированы в виде полых цилиндров соосно расположенных один внутри другого. Технологически катод может быть изготовлен в виде светоотражающего, или прозрачного компонента. Синтезированные органические структуры и анод сегментированы по окружности на требуемое количество светоизлучающих RGB элементов, формируя цилиндрический экран, состоящий из  $m$  строк и  $n$  столбцов с последовательно размещенных RGB элементами, реализующими кадровую развертку по строкам и столбцам.

МОСИД может содержать светоизлучающие сегменты, расположенные по окружности в последовательности  $R_1, G_1, B_1, R_2, G_2, B_2, \dots, R_n, G_n, B_n$  по горизонтали и  $R_1, G_1, B_1, R_2, G_2, B_2, \dots, R_m, G_m, B_m$  по вертикали (рисунок 6).

МОСИД может работать в следующих режимах светоизлучения:

- секторное светоизлучение;
- круговое светоизлучение всех сегментов;
- светоизлучение в виде строчной круговой развертки.



Светоизлучение в одном из пространственных секторов осуществляется при подаче напряжения на аноды ОСИД направленных в требуемый сектор излучения.

Круговое светоизлучение всех сегментов обеспечивается одновременной подачей соответствующих положительных напряжений на аноды всех сегментов.

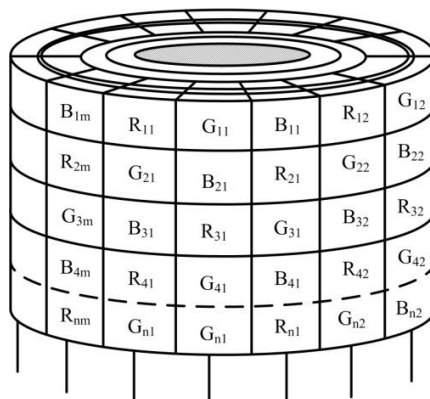


Рисунок 6 – МОСИД с  $n \times m$  сегментами

Светоизлучение в виде строчной круговой развертки реализуется включением светоизлучающих сегментов, расположенных по окружности в следующей последовательности:  $R_{11}, G_{11}, B_{11}, R_{12}, G_{12}, B_{12}, \dots, R_{1n}, G_{1n}, B_{1n}$ .

МОСИД, изготовленный по единой технологии может содержать когерентные электромагнитные волны соответствующих цветов (R-красного, G-зеленого и B-синего).

На рисунке 7 представлены: а) – МОСИД в разрезе вид сверху, б) – синфазное излучение всех RGB-сегментов МОСИД.

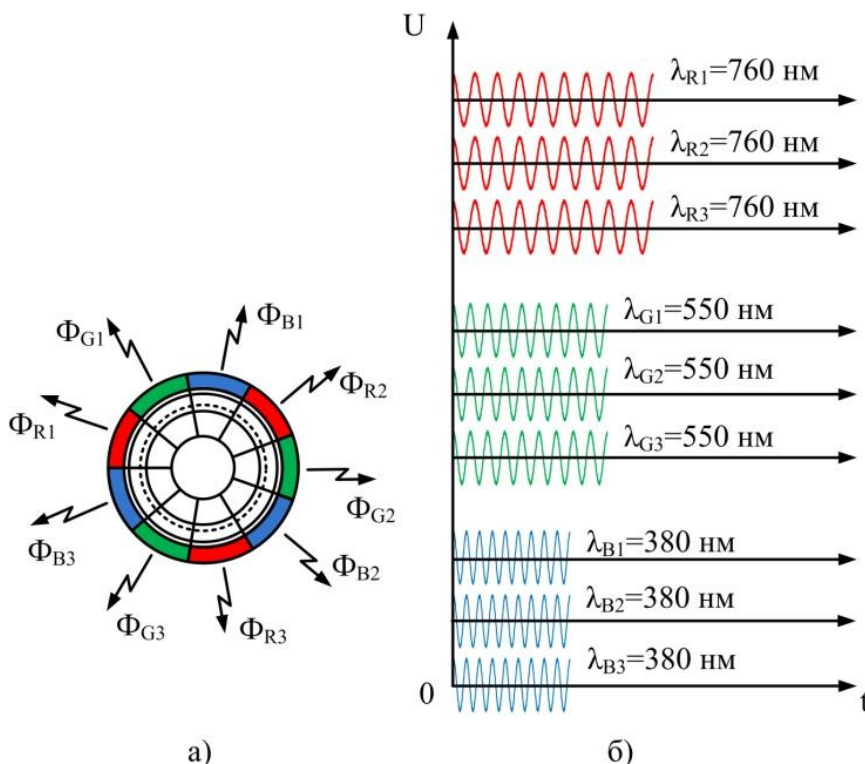


Рисунок 7 – Излучение многоканального светоизлучающего RGB-диода



Результатом перераспределения интенсивности света  $I$  в пространстве является интерференция волн. При частном случае  $I_1 = I_2$ , тогда, согласно (2),  $I = 4I_1$  в максимумах и  $I = 0$  в минимумах.

На рисунке 8 показаны диаграммы излучения трех когерентных красных излучений и их сложение в местах пересечения световых потоков интенсивность результирующих колебаний, которых определяется из выражений:

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \tag{5}$$

$$I_{23} = I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_2 I_3} \cos \varphi, \tag{6}$$

$$I_{13} = I_1 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_3} \cos \varphi. \tag{7}$$

Таким образом при моделировании информационной сети Li-Fi возможно использовать в определенных точках пространства усиление когерентного светового потока МОСИД.

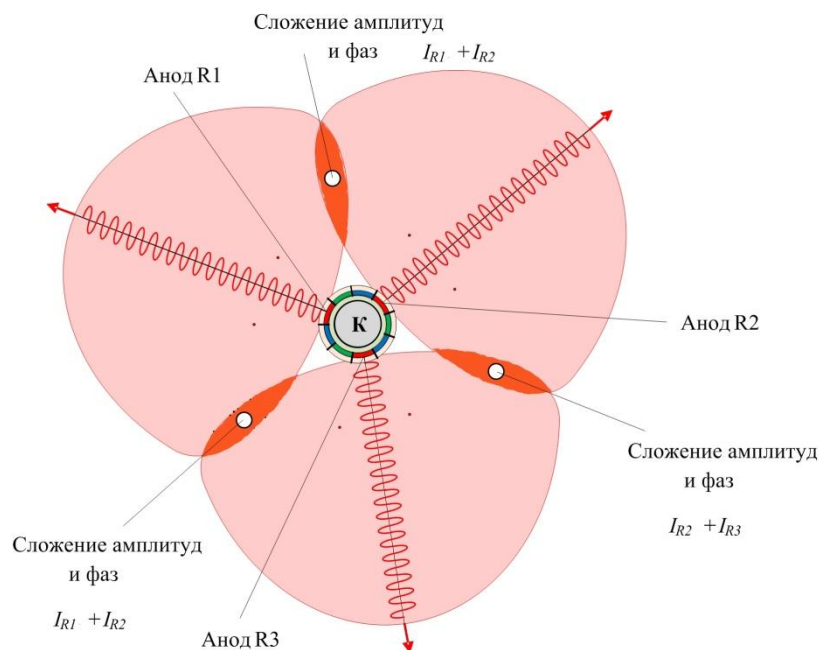


Рисунок 8 – Диаграммы излучения трех когерентных красных излучений и их сложение в местах пересечения

Рассмотрим некоторые другие примеры применения МОСИД.

На рисунке 9 в качестве примера представлена структурная схема приемо-передающего устройства на основе МОСИД.

Устройство включает в себя многоканальный светодиод, играющий роль передатчика и систему светофильтров и фотоприемников. Поток данных поступает на различные каналы МОСИД-передатчика. МОСИД начинает одновременно излучать электромагнитные волны в оптическом диапазоне. После считывания информации фотоприемниками происходит восстановление передаваемого изображения после чтения всех фрагментов.



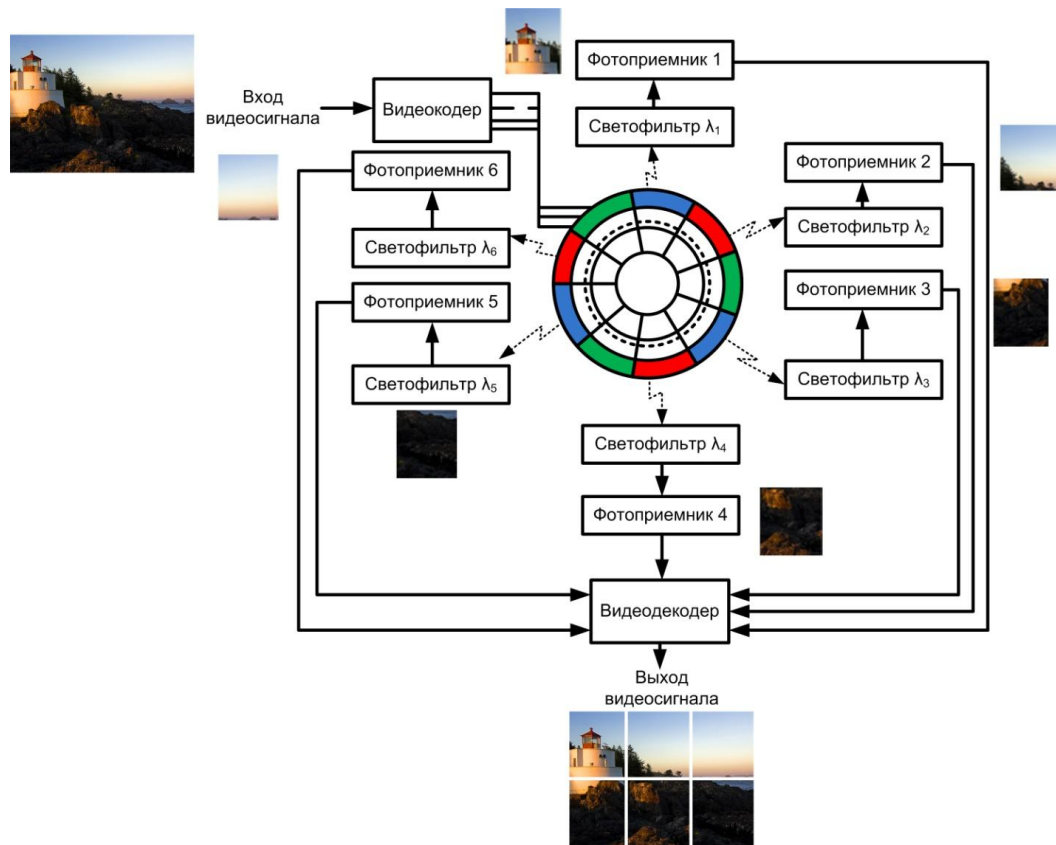


Рисунок 9 – Приемно-передающее устройство на основе МОСИД

**Выводы.** Таким образом, в результате проведенного анализа была обоснована перспективность применения многоканального светоизлучающего диода (МОСИД) в беспроводной передаче данных сети Li-Fi.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов С.В. Анатомия беспроводных сетей // КомпьютерПресс. 2002. № 7. С. 167–175.
2. Алексеев Д., Ермолаева В. Li-Fi – прорыв в науке или бесполезная игрушка? Преимущества и недостатки Li-Fi перед Wi-Fi // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 161–164.
3. R. Shinar and J. Shinar, Organic Electronics in Sensors and Biotechnology: mcGraw-hill, 2009. 407 p.
4. Paul Anthony h aigh, Zabih Ghassemlooy, Optical Communications Research Group, Northumbria University, Newcastle-upon-tyne, NE1 8St. Visible Light Communications using Organic Light Emitting Diodes. pp. 1–7.
5. Пат. 2548603 Российская Федерация, МПК7 h 01 L 51/50. Органический светоизлучающий диод / Кошелев А.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет». № 2013153781; заявл. 04.12.13; опубл. 20.04.15, Бюл. № 11.

#### REFERENCES

1. Pakhomov C.V. AnATOMiya besprovodnykh setey // KompyuterPress. 2002. № 7. pp. 167–175.
2. Alekseyev D., Ermolayeva V. Li-Fi – proryv v nauke ili bespoleznaya igrushka? Preimushchestva i nedostatki Li-Fi pered Wi-Fi // molodoy uchenyy. 2015. № 11. pp. 161–164.



3. R. Shinar and J. Shinar. Organic Electronics in Sensors and Biotechnology: mcGraw-hill . 2009. 407 p.

4. Paul Anthony ha igh. Zabih Ghassemlooy. Optical Communications Research Group. Northumbria University. Newcastle-upon-tyne. NE1 8St. Visible Light Communications using Organic Light Emitting Diodes. pp. 1–7.

5. Pat. 2548603 Rossiyskaya Federatsiya. mPK7 h 01 L 51/50. Organicheskiy svetoizluchayushchiy diod / Koshelev A.G. [i dr.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет». № 2013153781; заявл. 04.12.13; опubl. 20.04.15. Byul. № 11.

© Кошелев А.Г., Родионов Д.В., Беляев М.П., 2019

Кошелев Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник 23 отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, koshelev.44@mail.ru.

Родионов Денис Владимирович, младший научный сотрудник 23 отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, doc-82@bk.ru.

Беляев Максим Павлович, кандидат технических наук, начальник 23 отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, belyaev\_mp@mail.ru.