

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-12-03-13

УДК 681.586.5

Интегральный оптоэлектронный осциллятор в приложениях связи и сенсорных систем

Владислав Викторович Иванов¹✉, Григорий Сергеевич Воронков²✉,
Александр Сергеевич Голубчиков³, Игорь Васильевич Кузнецов⁴,
Елизавета Павловна Грахова⁵, Руслан Владимирович Кутлюяров⁶

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

¹ivanov.vv@ugatu.su <https://orcid.org/0000-0002-4716-9466>

²voronkov.gs@ugatu.su <https://orcid.org/0000-0002-8788-2696>

³zaqium@gmail.com <https://orcid.org/0009-0005-3939-9690>

⁴igor.kuznetsov-kiw@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-2804-6194>

⁵grakhova.ep@ugatu.su <https://orcid.org/0000-0003-2207-2702>

⁶kutluyarov.rv@ugatu.su <https://orcid.org/0000-0003-2724-6978>

Аннотация

Предмет исследования. Современные информационные технологии испытывают потребность в источниках высокочастотных радиосигналов (автогенераторах и синтезаторах частоты). Важными характеристиками таких устройств являются уровни фазовых шумов и коэффициент подавления боковых спектральных составляющих. Перспективным решением для получения радиосигналов с низким уровнем шумов и боковых спектральных составляющих является использование оптоэлектронного осциллятора с использованием технологий интегральной фотоники. Одним из ключевых элементов такого осциллятора является фазовый модулятор. В работе исследовались спектральные характеристики двух схем оптоэлектронных осцилляторов: на основе модулятора Маха–Цендера и электрооптического фазовращателя. **Цель работы.** Оценка качества гармонических колебаний, генерируемых оптоэлектронными осцилляторами двух типов (на основе фазового модулятора Маха–Цендера и электрооптического фазовращателя) и их сравнение по критериям уровня фазовых шумов и боковых спектральных составляющих. Анализ их применимости в телекоммуникационных и сенсорных системах. **Метод.** Проведено численное моделирование электрооптического фазовращателя в среде ANSYS Lumerical CHARGE и фазосдвигающей волоконной брэгговской решётки в среде ANSYS Lumerical MODE EME. В среде Ansys INTERCONNECT проведено численное моделирование работы оптоэлектронных осцилляторов. На основании полученных результатов проведены расчёты параметров качества синтезаторов частоты на основе оптоэлектронного осциллятора. **Основные результаты.** Рассмотрены схемы оптоэлектронных осцилляторов на основе модулятора Маха–Цендера и оптоэлектронного фазовращателя с фазосдвигающей решёткой Брэгга в качестве элемента управления частотой выходных колебаний. Произведено численное моделирование элементов схемы. Получены спектры сигналов на выходе оптоэлектронного осциллятора. Оценены уровни фазовых шумов, коэффициент подавления боковых спектральных составляющих. Показано, что в телекоммуникационных приложениях из-за более низкого уровня фазовых шумов предпочтительно использовать осциллятор на основе модулятора Маха–Цендера, в то время как для применения в системах опроса сенсоров (частотной интеррогации) допустимо использовать модулятор на основе фазовращателя. **Практическая значимость.** Результаты, полученные в представленной работе, могут использоваться для разработки оборудования радиосвязи в диапазоне

частот до 100 ГГц, а также в полностью интегральных сенсорных системах с частотной интеррогацией, то есть регистрацией изменения длины волны оптического излучения в виде частоты электрического сигнала.

Ключевые слова: синтезатор частоты, автогенератор, фазовый шум, интеррогация, оптоэлектроника, радиофотоника, фотонная интегральная схема

Благодарность: исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (код научной темы #FEUE-2021-0013, соглашение № 075-03-2023-119) в молодёжной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Ссылка для цитирования: Иванов В.В., Воронков Г.С., Голубчиков А.С., Кузнецов И.В., Грахова Е.П., Кутлuyarov Р.В. Интегральный оптоэлектронный осциллятор в приложениях связи и сенсорных систем // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 12. С. 3–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-03-13>

Коды OCIS: 250.5300, 230.0250.

Pic-based optoelectronic oscillator for communication and sensing applications

VLADISLAV IVANOV¹✉, GRIGORIY VORONKOV²✉, ALEKSANDR GOLUBCHIKOV³,
IGOR KUZNETSOV⁴, ELIZAVETA GRAKHOVA⁵, RUSLAN KUTLUYAROV⁶

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹ivanov.vv@ugatu.su

<https://orcid.org/0000-0002-4716-9466>

²voronkov.gs@ugatu.su

<https://orcid.org/0000-0002-8788-2696>

³zaqium@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-3939-9690>

⁴igor.kuznetsov-kiw@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-2804-6194>

⁵grakhova.ep@ugatu.su

<https://orcid.org/0000-0003-2207-2702>

⁶kutluyarov.rv@ugatu.su

<https://orcid.org/0000-0003-2724-6978>

Abstract

Subject of study. Modern information technologies require sources of high-frequency radio signals (oscillators and frequency synthesizers). The essential characteristics of such devices are the phase noise levels and the side spectral components suppression coefficient. An optoelectronic oscillator based on integrated photonics technologies is a promising solution for obtaining low-noise radio signals and side spectral components. One of the key elements of such an oscillator is a phase modulator. In this work, we studied the spectral characteristics of two optoelectronic oscillators: one based on a Mach–Zehnder modulator and another based on an electro-optical phase shifter. The **aim of study** is to evaluate the characteristics of the architectures of optoelectronic oscillators based on Mach–Zehnder phase modulator and the electro-optical phase shifter and to analyze the applicability of architectures in telecommunications and sensor systems. **Method.** We simulated the electro-optical phase shifter in the ANSYS Lumerical CHARGE environment and a phase-shifting fiber Bragg grating in the ANSYS Lumerical MODE EME environment. Simulation of the operation of the optoelectronic oscillator was carried out in the Ansys INTERCONNECT environment. We calculated the quality parameters of frequency synthesizers based on the optoelectronic oscillator according to the results obtained. **Main results.** We considered the schemes of optoelectronic oscillators based on Mach–Zehnder modulator and the optoelectronic phase shifter with the phase-shifting Bragg grating as a control element for the frequency of output oscillations. We simulated the critical elements and the entire circuit and obtained the signals' spectra at the optoelectronic oscillator output. The levels of phase noises and the side spectral components suppression coefficient are estimated. It is shown that in telecommunication applications, due to the lower phase noise level, it is preferable to use the oscillator based on Mach–Zehnder modulator. In contrast, applying the modulator based on the phase shifter is permissible in sensing systems for frequency interrogation. **Practical significance.** The results obtained in the presented work can be used to develop microwave devices in the frequency range of up to 100 GHz and fully integrated sensor systems with frequency interrogation.

Keywords: frequency synthesizer, oscillator, phase noise, interrogation, optoelectronics, microwave photonics, photonic integrated circuit

Acknowledgment: the research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for UUNiT (scientific topic code #FEUE-2021-0013, Agreement No. 075-03-2023-119) in the youth research laboratory of the Eurasian REC "Sensor systems based on integrated photonics devices".

For citation: Ivanov V.V., Voronkov G.S., Golubchikov A.S., Kuznetsov I.V., Grakhova E.P., Kutluyarov R.V. Pic-based optoelectronic oscillator for communication and sensing applications [In Russian] // Opticheskiy Zhurnal. 2023. V. 90. № 12. P. 3–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-12-03-13>

OCIS codes: 250.5300, 230.0250.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокочастотные (СВЧ) сигналы с частотами в диапазоне до 100 ГГц и более широко используются в различных приложениях: телекоммуникациях, радарх, медицинском оборудовании и сенсорных системах (в качестве устройств опроса — интеррогаторов). Традиционным с точки зрения электроники решением для получения СВЧ сигнала является использование автогенераторов с петлей обратной связи. Типовой СВЧ автогенератор с петлей обратной связи состоит из пассивной цепи с резонатором, определяющим частоту автоколебаний, и активного прибора, который компенсирует потери в резонаторе и обеспечивает возбуждение автоколебаний. Колебания возникают из-за воздействия собственных шумов, существующих в компонентах автогенератора. Чтобы обеспечить нарастание амплитуды колебания на выходе активного прибора, его малосигнальное усиление должно быть больше, чем потери в резонаторе [1]. Необходимо заметить, что обеспечение низкого уровня фазового шума генерируемого сигнала и эффективное подавление его боковых спектральных составляющих на высоких несущих частотах являются необходимыми требованиями к современным автогенераторам. Однако генерация СВЧ сигналов, удовлетворяющих указанным требованиям, представляет собой сложную техническую задачу для традиционных электронных генераторов [2]. Это, в основном, вызвано низкой добротностью их резонансных контуров. Высокую добротность обеспечивает применение кварцевой стабилизации частоты, однако рабочая полоса кварцевых автогенераторов (КАГ) ограничена частотой порядка 100 МГц. В простейшем случае радиочастотные СВЧ сигнала

можно получить умножением частоты выходного сигнала КАГ. Такое решение, однако, позволяет повысить частоту не более чем на порядок (до 1 ГГц). При этом в результате умножения частоты характеристика фазового шума ухудшается с увеличением частоты колебаний [3]. В качестве фильтра фазовых шумов традиционно применяются системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), обеспечивающие высокую скорость перестройки частоты. Сочетание ФАПЧ и умножения частот позволяет синтезировать частоты вплоть до D-диапазона СВЧ (до 170 ГГц) [4]. Однако схемы таких синтезаторов сложны, и вопрос повышения уровня фазовых шумов при высокой кратности умножения частоты остаётся проблемой.

Перспективным решением для генерации СВЧ сигналов является использование оптоэлектронного осциллятора (ОЭО). ОЭО представляет собой простую и экономичную электрооптическую систему для генерации СВЧ сигналов, обладающих сверхнизким фазовым шумом [2]. В качестве высокодобротного оптического элемента может использоваться длинная оптическая линия задержки [5], добротность которой пропорциональна отношению времени задержки к потерям в линии. Другим вариантом является применение высокодобротного оптического резонатора, например, фазосдвигающей волоконной брэгговской решётки (ФС-ВБР), микрокольцевых [6] и микродисковых [7] резонаторов. Частота ОЭО (рис. 1) определяется рабочим диапазоном частот его элементов (СВЧ усилителя (У) и фотодетектора (ФД)) и может достигать 100 ГГц и выше [3]. Отметим, что характеристики фазового шума увеличиваются с частотой незначительно [5]. Кроме того, ОЭО могут одновре-

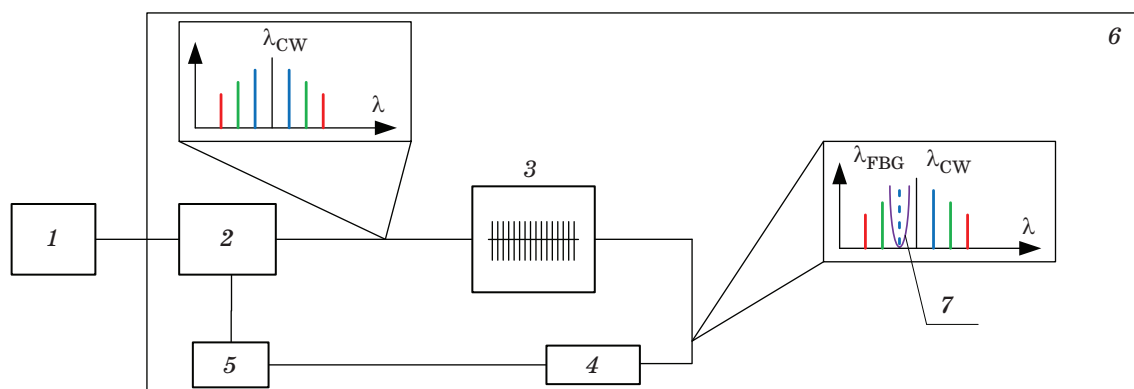


Рис. 1. Структурная схема ОЭО, где 1 — лазерный источник, 2 — фазовый модулятор, 3 — фазосдвигающая волоконная брэгговская решётка, 4 — фотодетектор, 5 — электрический усилитель, 6 — оптоэлектронный осциллятор, 7 — полоса задерживания

Fig. 1. OEO block diagram where 1 — laser source, 2 — phase modulator, 3 — phase-shifted fiber Bragg grating, 4 — photodetector, 5 — electrical amplifier, 6 — optoelectronic oscillator, 7 — stopband

менно генерировать сигналы как в СВЧ, так и в оптическом (около 200 ТГц) диапазонах [8]. Из-за этих особенностей ОЭО в последние годы широко исследовались для различных приложений, где генерируется, обрабатывается или принимается СВЧ сигнал [3]. В системах опроса датчиков применение ОЭО в качестве частотного интеррогатора позволяет повысить добротность сенсорной системы, что увеличивает её чувствительность и предел обнаружения [9].

Несмотря на то, что с момента первой публикации в 1996 году было предложено и продемонстрировано множество архитектур ОЭО [10], большинство ОЭО по-прежнему реализуются на основе дискретных оптических и оптоэлектронных устройств. Стоимость и высокое энергопотребление ограничивают сферы применения ОЭО и его внедрение в коммерческие системы.

Развитие технологии интегральной фотоники позволило создать ОЭО на основе фотонных интегральных схем (ФИС) [11]. Это обеспечило снижение габаритов ОЭО и повышение его энергоэффективности. Возможность его изготовления на платформе «кремний-на-изоляторе» (КНИ) явилась важным шагом на пути к новому поколению компактных и универсальных ОЭО для практических приложений [11].

В работе [11] в качестве фазового модулятора (ФМ) использовался модулятор Маха–Цендера (ММЦ). Проблемами такого решения являются необходимость обеспечения требу-

емой разности фаз модулирующих сигналов, поступающих на плечи ММЦ и необходимость использования СВЧ разветвителя (либо внешнего, либо интегрированного в ММЦ).

Альтернативным решением является использование в качестве фазового модулятора электрооптического фазовращателя (ФВ). Статья посвящена оценке качества гармонических колебаний, генерируемых интегральными ОЭО на основе фазового ММЦ и ФВ, сравнению этих архитектур по критериям уровня фазовых шумов и боковых спектральных составляющих, а также анализу ограничений использования конкретных схем ОЭО в телекоммуникационных системах (в качестве СВЧ синтезаторов частоты) и в сенсорных системах (в качестве интеррогатора).

ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Как было указано выше, оптоэлектронный осциллятор — это гибридная система, создающая самоподдерживающиеся СВЧ колебания при воздействии модулированного оптического излучения на фотодетектор. Схема исследуемого ОЭО на основе ФС-ВБР и интегрального фазовращателя на платформе кремний-на-изоляторе приведена на рис. 1.

Узкополосное излучение лазерного источника 1 с длиной волны λ_{CW} поступает на оптический вход фазового модулятора 2. Пройдя через фазовый модулятор, оно преобразуется

в излучение с линейчатым спектром. При этом симметричные относительно λ_{CW} спектральные составляющие оказываются противофазными. При воздействии на фотодетектор 4 такие компоненты взаимно компенсируются. Однако ФС-ВБР 3 (резонансная длина волны λ_{FBG} (7)), выполняющая роль режекторного узкополосного фильтра, подавляет одну из спектральных составляющих, что приводит к появлению на входе фотодиода двух близко расположенных оптических несущих. Таким образом, совместно с источником излучения и фазовым модулятором, ФС-ВБР работает как микроволновый фотонный фильтр (МФФ) для выбора частоты для ОЭО [12]. Генерация СВЧ сигнала основана на принципе биения оптических несущих [13]. Его частота определяется разницей между длиной волны оптической несущей λ_{CW} и резонансной длиной волны ФС-ВБР [12]:

$$f = f_{CW} - f_{FBG} \approx c \left(\frac{\lambda_{FBG} - \lambda_{CW}}{\lambda_{CW}^2} \right), \quad (1)$$

где c — скорость света, λ_{CW} , λ_{FBG} — длина волны лазера и резонансная длина волны сенсора соответственно, $f_{CW} = \frac{c}{\lambda_{CW}}$, $f_{FBG} = \frac{c}{\lambda_{FBG}}$.

Таким образом, на выходе фотодетектора формируется СВЧ сигнал, который поступает на электрический усилитель 5 и далее — на электрический вход ФМ, замыкая контур ОЭО 6. Следовательно, при использовании в качестве синтезатора частоты его перестройку можно осуществлять, изменяя резонансную длину волны ФС-ВБР. То же свойство используется при применении ОЭО в сенсорной системе — изменение резонансной длины волны фильтра приводит к изменению выходной частоты ОЭО.

Как было показано выше, фазовый модулятор может быть реализован на фазовращателе или на ММЦ. Конструктивно ФВ является более простым элементом интегральной фотоники. Однако необходимо оценить спектральные характеристики ОЭО на ФВ в сравнении с ОЭО на ММЦ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

Моделирование фазовращателя произведено для платформ КНИ в пакете ANSYS Lumerical.

Модуль CHARGE использовался для моделирования распределения зарядов в электрооптическом фазовращателе. Полученные результаты использованы в модуле Lumerical FDE, использованном для вычисления зависимости изменения показателя преломления от приложенного напряжения. Полученные зависимости затем преобразованы в компактную модель для модуля Lumerical INTERCONNECT, в котором происходило моделирование работы предлагаемой системы. На рис. 2 представлена 3D-модель сегмента фазовращателя с указанием материалов.

При моделировании предполагается, что структура фазовращателя однородна вдоль направления распространения света, поэтому необходимо моделировать только поперечное сечение устройства.

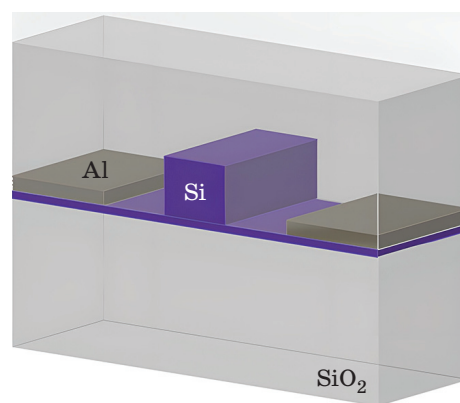


Рис. 2. Структура фазовращателя
Fig. 2. Phase shifter structure

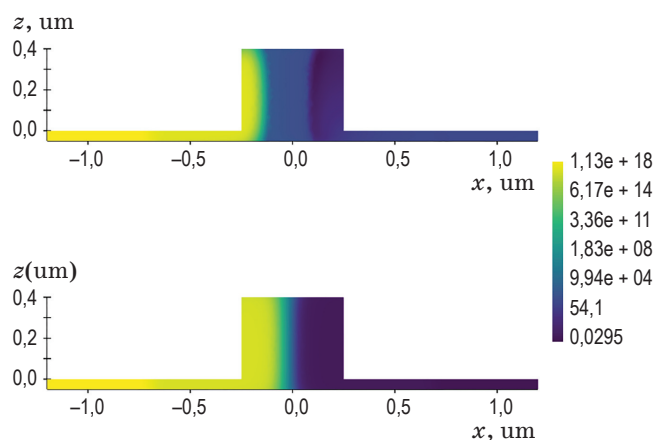


Рис. 3. Профиль распределения дырок в фазовращателе
Fig. 3. Holes distribution profile in the phase shifter

На приведённом выше рис. 3 показан профиль распределения дырок в логарифмическом масштабе в поперечном сечении фазовращателя для напряжения смещения 4 В (сверху) и 0 В (снизу), приложенного к устройству. Из рисунков видно, что при отсутствии напряжения смещения распределение заряда в поперечном сечении волновода симметрично. При достаточно сильном обратном смещении электроны частично выталкиваются из волновода (влево) в результате расширения области обеднения поперёк p – n -перехода, что вызывает довольно резкое изменение распределения заряда в поперечном сечении волновода.

Для моделирования волоконной решётки использовалась среда Ansys Lumerical MODE ЕМЕ. Особенности производства и структур подобных волоконных решёток описаны в работе [14]. Длина смоделированной ФС-ВБР составила 4 мм, размер дефектного слоя 0,516 мкм. Для управления частотой СВЧ сигнала дефектный слой ФС-ВБР деформировался с шагом 10 пм. При использовании такой решётки в качестве сенсора его чувствительность составит $1,33 \times 10^{-8}$ пм/(мкм/м). ФС-ВБР была рассчитана с использованием метода конечных элементов и затем импортирована в среду системного моделирования Ansys Lumerical INTERCONNECT.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ БОКОВЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ОЭО

Моделирование было проведено на основе схемы, показанной на рис. 1, в среде Ansys Lumerical INTERCONNECT со следующими параметрами схемы: длина волны источника излучения 1550 нм, ширина его полосы 1 МГц, мощность излучения 0 дБм, коэффициент усиления электрического усилителя 70 дБ. Общие параметры моделирования: частота дискретизации $1,8 \times 10^{11}$ Гц, временной промежуток 2×10^{-5} с. На выходе ФД фиксировался спектр СВЧ сигнала, измерялся уровень боковых спектральных составляющих и вычислялся уровень фазовых шумов. Пример полученного спектра показан на рис. 4.

Для моделирования схемы ОЭО с модулятором Маха–Цендера использовался стандартный элемент из библиотеки Ansys Lumerical

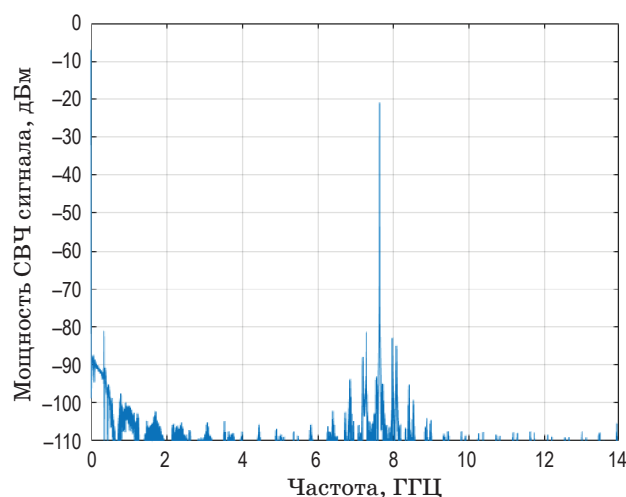


Рис. 4. Спектр выходного СВЧ сигнала

Fig. 4. Output microwave signal spectrum

Таблица 1. Уровни боковых спектральных составляющих

Table 1. Side spectral components' levels

| Выходная частота, ГГц | ФС, дБм | ММЦ, дБм |
|-----------------------|---------|----------|
| 1,25 | –78,62 | –81,43 |
| 2,50 | –79,16 | –82,85 |
| 3,74 | –79,7 | –83,51 |
| 4,99 | –80,24 | –84,22 |
| 6,24 | –80,78 | –84,86 |
| 7,49 | –81,32 | –86,12 |
| 8,73 | –81,86 | –86,75 |
| 9,98 | –82,4 | –87,41 |
| 11,23 | –82,94 | –88,59 |
| 12,48 | –83,48 | –89,42 |

INTERCONNECT со следующими параметрами: напряжение смещения 2 В, полуволновое напряжение 4 В, коэффициент затухания 6 дБ, коэффициент контрастности 30 дБ.

Уровни боковых спектральных составляющих для ОЭО с ФС и ММЦ для различных частот приведены в табл. 1.

Далее уровни боковых составляющих сравнивались по формуле:

$$\Delta N = N_{\text{PS}} - N_{\text{MZM}}, \quad (2)$$

где N_{MZM} — уровень боковых спектральных составляющих СВЧ сигнала в схеме с ММЦ,

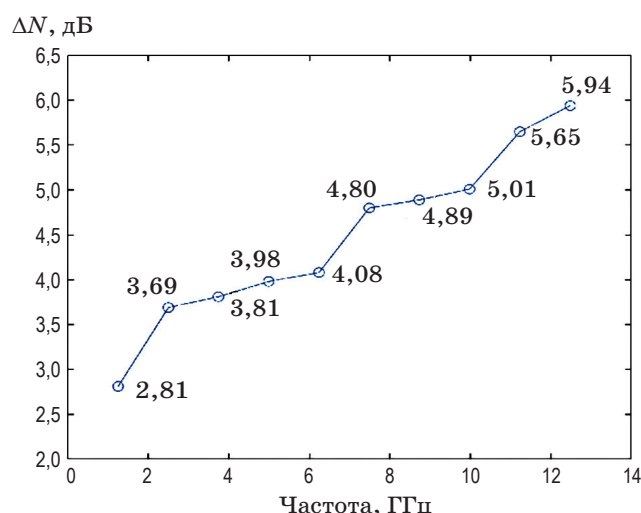


Рис. 5. Зависимость разности уровней боковых спектральных составляющих ОЭО с ФВ и ОЭО с ММЦ от частоты СВЧ сигнала

Fig. 5. The difference in the side spectral components' levels of the PS-based OEO and the MZM-based OEO on the microwave signal frequency

N_{PS} — уровень боковых спектральных составляющих СВЧ сигнала в схеме с ФВ. На рис. 5 показана зависимость ΔN от частоты СВЧ сигнала.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов показывает, что уровень боковых спектральных составляющих в схеме ОЭО с ФВ не менее чем на 2,81 дБ выше, чем в схеме с ММЦ. Однако коэффициент подавления боковых спектральных составляющих для схемы с ФВ при этом составляет не менее 61,12 дБ (рис. 4). Далее по полученным результатам произведём расчёт уровня фазовых шумов по методике, описанной в работе [15]. Результаты расчёта для двух типов ОЭО приведены в табл. 2.

На рис. 6 показана разница между уровнями фазовых шумов для ОЭО с ФС и ММЦ. Видно, уровень фазовых шумов ОЭО с ФВ выше во всей полосе отстройки, чем ОЭО с ММЦ, однако характер зависимости немонотонен.

Полученные значения уровня фазового шума оказываются выше, чем в традиционных системах с ФАПЧ, работающих в близком частотном диапазоне, например, производства Analog Devices (США) [16]. Тем не менее, с учётом того, что с помощью ОЭО возможна

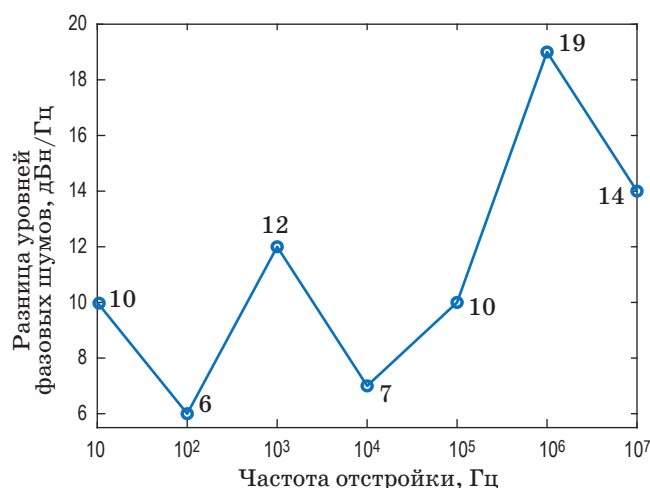


Рис. 6. Зависимость разницы между уровнями фазовых шумов от частоты отстройки

Fig. 6. The difference between the phase noise levels in dependence on the tuning frequency

Таблица 2. Фазовый шум с выходной мощностью сигнала –20,2 дБм на частоте 7,49 ГГц

Table 2. Phase noise levels for output signal at 7.49 GHz with an –20.2 dBm output power

| Отстройка частоты, Гц | ОЭО с ФС, дБн/Гц | ОЭО с ММЦ, дБн/Гц |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| 10 | –11,8 | –21,8 |
| 10^2 | –21,8 | –27,8 |
| 10^3 | –26,8 | –38,8 |
| 10^4 | –37,8 | –44,8 |
| 10^5 | –42,8 | –52,8 |
| 10^6 | –50,8 | –69,8 |
| 10^7 | –64,8 | –78,8 |

генерация частот до сотен гигагерц, применение оптоэлектронных осцилляторов в системах радиосвязи можно считать перспективным. При этом более предпочтительным в телекоммуникационных системах является применение ОЭО с ММЦ из-за более низкого уровня фазовых шумов. Возможная реализация ОЭО с ММЦ приведена на рис. 7. Элементы ввода оптического сигнала в волокно (согласователи размера модового пятна, СРМП) могут быть реализованы в виде решёток ввода-вывода или сужающихся волноводов.

Для дальнейшего снижения уровня фазового шума может применяться, например,

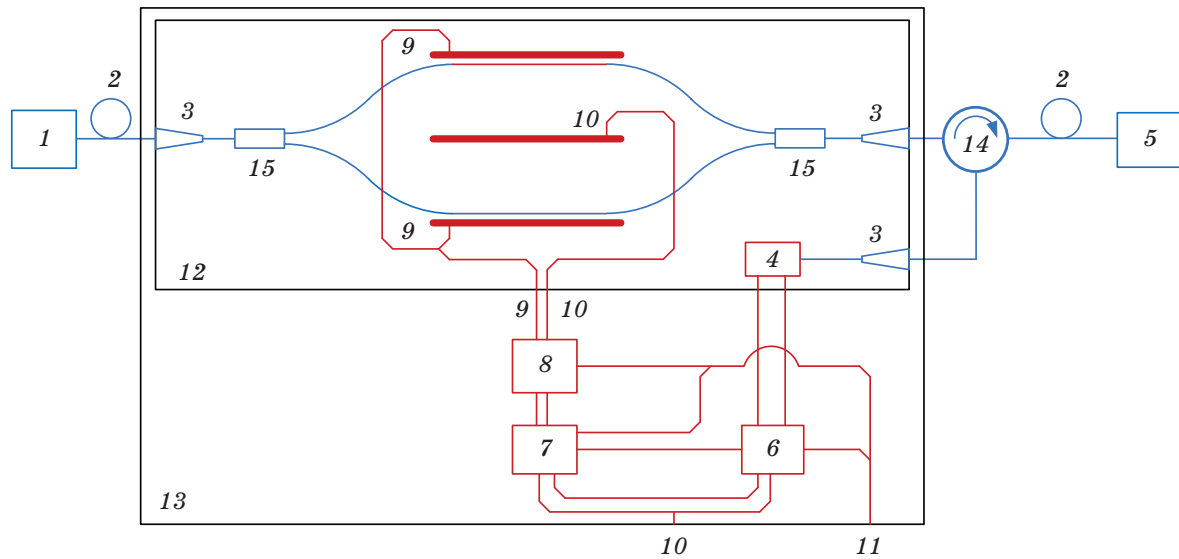


Рис. 7. Возможная реализация ОЭО с ММЦ (без соблюдения масштаба). 1 — источник излучения, 2 — оптическое волокно, 3 — согласователь размера модового пятна, 4 — фотодетектор, 5 — фазосдвигающая волоконная брэгговская решётка, 6 — трансимпедансный усилитель, 7 — СВЧ усилитель, 8 — устройство смещения, 9 — вход СВЧ, 10 — заземляющий контакт, 11 — контакт питания, 12 — фотонная интегральная схема, 13 — печатная плата, 14 — циркулятор, 15 — многомодовый ответвитель

Fig. 7. The MZM-based OEO possible implementation (not to scale). 1 — laser source, 2 — optical fiber, 3 — spot size converter, 4 — photodetector, 5 — phase-shifted fiber Bragg grating, 6 — transimpedance amplifier, 7 — microwave amplifier, 8 — bias-T, 9 — microwave contact, 10 — ground contact, 11 — supply voltage contact, 12 — photonic integrated circuit, 13 — printed circuit board, 14 — circulator, 15 — multimode interferometer

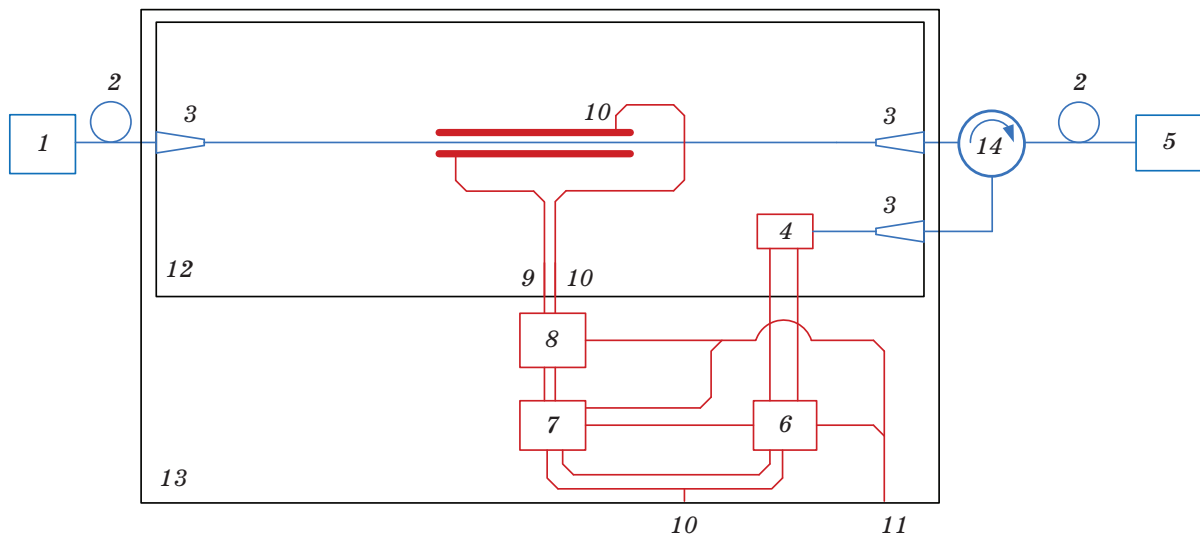


Рис. 8. Возможная реализация ОЭО на ФВ (без соблюдения масштаба). 1 — источник излучения, 2 — оптическое волокно, 3 — согласователь размера модового пятна, 4 — фотодетектор, 5 — фазосдвигающая волоконная брэгговская решётка, 6 — трансимпедансный усилитель, 7 — СВЧ усилитель, 8 — устройство смещения, 9 — вход СВЧ, 10 — заземляющий контакт, 11 — контакт питания, 12 — фотонная интегральная схема, 13 — печатная плата, 14 — циркулятор

Fig. 8. The PS-based OEO possible implementation (not to scale). 1 — laser source, 2 — optical fiber, 3 — spot size converter, 4 — photodetector, 5 — phase-shifted fiber Bragg grating, 6 — transimpedance amplifier, 7 — microwave amplifier, 8 — bias-T, 9 — microwave contact, 10 — ground contact, 11 — supply voltage contact, 12 — photonic integrated circuit, 13 — printed circuit board, 14 — circulator

использование двойной петли обратной связи [17], что позволяет обеспечить уровень фазовых шумов до уровня в -123 дБн/Гц.

Сенсорные системы не столь чувствительны к фазовым шумам, в то же время, при массовом производстве сенсорных систем на ФИС важно обеспечить простоту конструкции интеррогаторов. При этом использование частотной интеррогации позволяет существенно повысить качество сенсорной системы [9], повысив внутрисистемную разрешающую способность (LoD, limit of detection) на 5 порядков при допущении, что минимальный сдвиг СВЧ частоты Δf , который можно измерить, равен 100 кГц (обычно в микроволновых системах стабильность частоты выше [18]). Исходя из этого, в сенсорных системах с точки зрения упрощения их конструкции более предпочтительным представляется использование ОЭО на ФВ. Возможная реализация ОЭО с ФВ приведена на рис. 8.

Как видно из рис. 7, 8, реализация ОЭО с ММЦ является более сложной с точки зрения изготовления, однако, имеет лучшие выходные характеристики по фазовому шуму и уровню боковых спектральных составляющих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ченакин А. Фазовые шумы в СВЧ генераторах, методы решения проблемы // Электроника, наука, технология, бизнес. 2011. Т. 4. С. 52–61
2. Yao X.S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE J. Quantum Electron. 1996. V. 32. № 7. P. 1141–1149
3. Hao T., Liu Y., Tang J. et al. Recent advances in optoelectronic oscillators // Adv. Photonics. 2020. V. 2. № 04. P. 1. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.4.044001>
4. Chaudhari J.P., Patel B., Patel A.V. et al. Highly stable signal generation in microwave interferometer using PLLs // Fusion Eng. Des. 2020. V. 161. P. 111993. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111993>
5. Eliyahu D., Seidel D., Maleki L. Phase noise of a high performance OEO and an ultralow noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system // 2008 IEEE International Frequency Control Symposium. Honolulu. 2008. P. 811–814. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2008.4623111>
6. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T. et al. Silicon microring resonators // Laser Photonics Rev. 2012. V. 6. № 1. P. 47–73. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>
7. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing // J. Light. Technol. 2017. V. 35. № 16. P. 3489–3497. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2586181>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты моделирования двух вариантов реализации оптоэлектронного осциллятора: с фазовращателем и с модулятором Маха–Цендера в качестве фазового модулятора. В качестве управляющего частотой элемента использовалась фазосдвигающая волоконная брэгговская решётка. Система на основе оптоэлектронного фазовращателя показала возможность генерировать высокочастотные сигналы с коэффициентом подавления боковых спектральных составляющих не менее $61,12$ дБ. Уровень фазовых шумов для описанной схемы изменялся от $-11,8$ дБн/Гц до $-64,8$ дБн/Гц. Уровень боковых спектральных составляющих по сравнению со схемой с использованием модулятора Маха–Цендера оказался выше на $2,81$ – $5,94$ дБм, что не является ограничивающим фактором для применения описанной схемы в интеррогаторах сенсорных систем. В телекоммуникационных приложениях предпочтительнее использовать оптоэлектронный осциллятор на фазовом модуляторе Маха–Цендера, обеспечивающий меньший уровень фазовых шумов и более эффективное подавление боковых спектральных составляющих.

REFERENCES

1. Chenakin A. Phase noise in microwave generators problem solving methods // Electron. Sci. Technol. Bus. 2011. V. 4. P. 52–61.
2. Yao X.S., Maleki L. Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE J. Quantum Electron. 1996. V. 32. P. 1141–1149.
3. Hao T., Liu Y., Tang J. et al. Recent advances in optoelectronic oscillators // Adv. Photonics. 2020. V. 2. № 04. P. 1. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.4.044001>
4. Chaudhari J.P., Patel B., Patel A.V. et al. Highly stable signal generation in microwave interferometer using PLLs // Fusion Eng. Des. 2020. V. 161. P. 111993. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111993>
5. Eliyahu D., Seidel D., Maleki L. Phase noise of a high performance OEO and an ultralow noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system // 2008 IEEE International Frequency Control Symposium. Honolulu. 2008. P. 811–814. <https://doi.org/10.1109/FREQ.2008.4623111>
6. Bogaerts W., De Heyn P., Van Vaerenbergh T. et al. Silicon microring resonators // Laser Photonics Rev. 2012. V. 6. № 1. P. 47–73. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100017>
7. Yao J. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing // J. Light. Technol. 2017. V. 35. № 16. P. 3489–3497. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2586181>

8. Voronkov G., Zakoyan A., Ivanov V. et al. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry // *Sensors*. 2022. V. 22. № 23. P. 9553. <https://doi.org/10.3390/s22239553>
9. Voronkov G.S., Aleksakina Y.V., Ivanov V.V. et al. Enhancing the performance of the photonic integrated sensing system by applying frequency interrogation // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 1. P. 193. <https://doi.org/10.3390/nano13010193>
10. Zou X., Liu X., Li W. et al. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection // *IEEE J. Quantum Electron.* 2016. V. 52. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1109/JQE.2015.2504088>
11. Zhang W., Yao J. Silicon photonic integrated optoelectronic oscillator for frequency-tunable microwave generation // *J. Light. Technol.* 2018. V. 36. № 19. P. 4655–4663. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2829823>
12. Yang Y., Wang M., Shen Y. et al. Refractive index and temperature sensing based on an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry–Perot fiber Bragg grating // *IEEE Photonics J.* 2018. V. 10. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2778224>
13. Grakhova E.P., Voronkov G.S., Ishmiyarov A.A. et al. Performance analysis of the RoF uplink channel // *Optical Technologies for Telecommunications* / Ed. Burdin V.A. et al. Samara. Russian Federation: SPIE, 2021. P. 36. <https://doi.org/10.1117/12.2593053>
14. Madan A., Yap SHK, Paulose V. et al. Investigation of a Bragg grating-based Fabry–Perot structure inscribed using femtosecond laser micromachining in an adiabatic fiber taper // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. № 3. P. 1069. <https://doi.org/10.3390/app10031069>
15. Li M., Hao T., Li W. et al. Tutorial on optoelectronic oscillators // *APL Photonics*. 2021. V. 6. № 6. P. 061101. <https://doi.org/10.1063/5.0050311>
16. Microwave Wideband synthesizer with integrated VCO ADF4355 [Electronic resource]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4355.pdf> (accessed: 20.02.2023)
17. Xu L., Hu X., Zhang Y. et al. A highly sensitive and precise temperature sensor based on optoelectronic oscillator // *Opt. Commun.* 2021. V. 483. P. 126625. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126625>
18. Zou X., Lu B., Pan W. et al. Photonics for microwave measurements: Photonics for microwave measurements // *Laser Photonics Rev.* 2016. V. 10. № 5. P. 711–734. <https://doi.org/10.1002/lpor.20160001>
8. Voronkov G., Zakoyan A., Ivanov V. et al. Design and modeling of a fully integrated microring-based photonic sensing system for liquid refractometry // *Sensors*. 2022. V. 22. № 23. P. 9553. <https://doi.org/10.3390/s22239553>
9. Voronkov G.S., Aleksakina Y.V., Ivanov V.V. et al. Enhancing the performance of the photonic integrated sensing system by applying frequency interrogation // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. № 1. P. 193. <https://doi.org/10.3390/nano13010193>
10. Zou X., Liu X., Li W. et al. Optoelectronic oscillators (OEOs) to sensing, measurement, and detection // *IEEE J. Quantum Electron.* 2016. V. 52. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1109/JQE.2015.2504088>
11. Zhang W., Yao J. Silicon photonic integrated optoelectronic oscillator for frequency-tunable microwave generation // *J. Light. Technol.* 2018. V. 36. № 19. P. 4655–4663. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2829823>
12. Yang Y., Wang M., Shen Y. et al. Refractive index and temperature sensing based on an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry–Perot fiber Bragg grating // *IEEE Photonics J.* 2018. V. 10. № 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2778224>
13. Grakhova E.P., Voronkov G.S., Ishmiyarov A.A. et al. Performance analysis of the RoF uplink channel // *Optical Technologies for Telecommunications* / Ed. Burdin V.A. et al. Samara. Russian Federation: SPIE, 2021. P. 36. <https://doi.org/10.1117/12.2593053>
14. Madan A., Yap SHK, Paulose V. et al. Investigation of a Bragg grating-based Fabry–Perot structure inscribed using femtosecond laser micromachining in an adiabatic fiber taper // *Appl. Sci.* 2020. V. 10. № 3. P. 1069. <https://doi.org/10.3390/app10031069>
15. Li M., Hao T., Li W. et al. Tutorial on optoelectronic oscillators // *APL Photonics*. 2021. V. 6. № 6. P. 061101. <https://doi.org/10.1063/5.0050311>
16. Microwave Wideband synthesizer with integrated VCO ADF4355 [Electronic resource]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4355.pdf> (accessed: 20.02.2023)
17. Xu L., Hu X., Zhang Y. et al. A highly sensitive and precise temperature sensor based on optoelectronic oscillator // *Opt. Commun.* 2021. V. 483. P. 126625. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126625>
18. Zou X., Lu B., Pan W. et al. Photonics for microwave measurements: Photonics for microwave measurements // *Laser Photonics Rev.* 2016. V. 10. № 5. P. 711–734. <https://doi.org/10.1002/lpor.20160001>

АВТОРЫ

Владислав Викторович Иванов — младший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; Scopus ID: 57666577100, <https://orcid.org/0000-0002-4716-9466>, ivanov.vv@ugatu.su

Григорий Сергеевич Воронков — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; Scopus ID: 57194435754, <https://orcid.org/0000-0002-8788-2696>, voronkov.gs@ugatu.su

Александр Сергеевич Голубчиков — младший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; <https://orcid.org/0009-0005-3939-9690>, zaqium@gmail.com

AUTHORS

Vladislav V. Ivanov — Junior Researcher, Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; Scopus ID: 57666577100, <https://orcid.org/0000-0002-4716-9466>, ivanov.vv@ugatu.su

Grigory S. Voronkov — PhD, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; Scopus ID: 57194435754, <https://orcid.org/0000-0002-8788-2696>, voronkov.gs@ugatu.su

Aleksandr S. Golubchikov — Junior Researcher, Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; <https://orcid.org/0009-0005-3939-9690>, zaqium@gmail.com

Игорь Васильевич Кузнецов — доктор техн. наук, профессор, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; Scopus ID: 36793265800, <https://orcid.org/0009-0009-2804-6194>, igor.kuznetsov-kiw@mail.ru

Елизавета Павловна Грахова — канд. техн. наук, заведующая лабораторией «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники», Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; Scopus ID: 56586258500, <https://orcid.org/0000-0003-2207-2702>, grakhova.ep@ugatu.ru

Руслан Владимирович Кутлугаров — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Уфа, Россия; Scopus ID: 26644102800, <https://orcid.org/0000-0003-2724-6978>, kutluyarov.rv@ugatu.ru

Igor V. Kuznetsov — Dr.Sci., Professor, Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; Scopus ID: 36793265800, <https://orcid.org/0009-0009-2804-6194>, igor.kuznetsov-kiw@mail.ru

Elizaveta P. Grakhova — PhD, Head of Research Laboratory "Sensor systems based on integrated photonics devices", Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; Scopus ID: 56586258500, <https://orcid.org/0000-0003-2207-2702>, grakhova.ep@ugatu.ru

Ruslan V. Kutluyarov — PhD, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia; Scopus ID: 26644102800, <https://orcid.org/0000-0003-2724-6978>, kutluyarov.rv@ugatu.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2023

Одобрена после рецензирования 31.05.2023

Принята к печати 30.10.2023

The article was submitted to the editorial office 28.02.2023

Approved after review 31.05.2023

Accepted for publication 30.10.2023