DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.334.346

Принципы построения оптоэлектронных СВЧ-генераторов

Часть II

А. Б. Устинов[1], И. Ю. Таценко[1], А. А. Никитин[1], А. В. Кондрашов[1], А. В. Шамрай[2], А. В. Иванов[3]

[1] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ) им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН Санкт-Петербург, Россия*

[3] *АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия*

Статья знакомит читателей с принципами создания оптоэлектронных СВЧ-генераторов. В первой части обзора (см. ФОТОНИКА. 2021; 15(3):228–237. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.3.228.237) были кратко рассмотрены физические процессы, лежащие в основе работы различных типов генераторов. Во второй части обзора рассмотрены оптоэлектронные СВЧ-генераторы, созданные на основе активных кольцевых резонансных систем, а также проведено сопоставление фазовых шумов оптоэлектронных генераторов различных типов.

Ключевые слова: оптоэлектронные генераторы, СВЧ-генератор, оптические частотные гребенки, моды шепчущей галереи, интегральные кольцевые резонаторы

Статья получена: 15.04.2021
Принята к публикации: 11.05.2021

4. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВЧ ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ

4.1. Однокольцевые ОЭГ

Наиболее часто в научной литературе исследуется конфигурация ОЭГ с модулятором Маха-Цендера [28–42]. Такой генератор представ-

Principles of Constructing Optoelectronic Microwave Oscillators

Part II

A. B. Ustinov[1], I. Yu. Tatsenko[1], A. A. Nikitin[1], A. V. Kondrashov[1], A. V. Shamray[2], A. V. Ivanov[3]

[1] *Saint Petersburg Electrotechnical University (LETI), Saint Petersburg, Russia*

[2] *A. F. Ioffe Physical and Technical Institute of RAS, Saint Petersburg, Russia*

[3] *M. F. Stelmakh Research Institute «Polyus» JSC, Moscow, Russia*

The article confronts the readers with the principles of creating optoelectronic microwave generators. The physical processes underlying the operation of various types of oscillators are briefly considered in the first part of the review (see PHOTONICS RUSSIA. 2021; 15(3):228–237. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.3.228.237). Optoelectronic microwave generators based on active ring resonant systems and a comparison of the phase noise of different types of optoelectronic generators are considered in the second part of the review.

Key words: Optoelectronic Oscillator, Microwave Oscillator, Optical frequency comb, Integrated ring resonators

Received on: 15.04.2021
Accepted on: 11.05.2021

4. OPTOELECTRONIC MICROWAVE OSCILLATORS BASED ON ACTIVE RING RESONANT SYSTEMS

4.1. Single-ring OEO

The configuration of the Optoelectronic Oscillator (OEO) with the Mach-Zehnder modulator is most often studied in the scientific literature [28–42]. Such a generator is a ring circuit with positive feedback, in which the optical radiation is modulated with a microwave signal using an electro-optical

ляет собой кольцевую схему с положительной обратной связью, в которой с помощью электрооптического модулятора осуществляется модуляция оптического излучения СВЧ-сигналом, а в качестве частотно-селективного элемента используется полосно-пропускающий СВЧ-фильтр (рис. 10). Впервые такая схема генератора была предложена в работе [29].

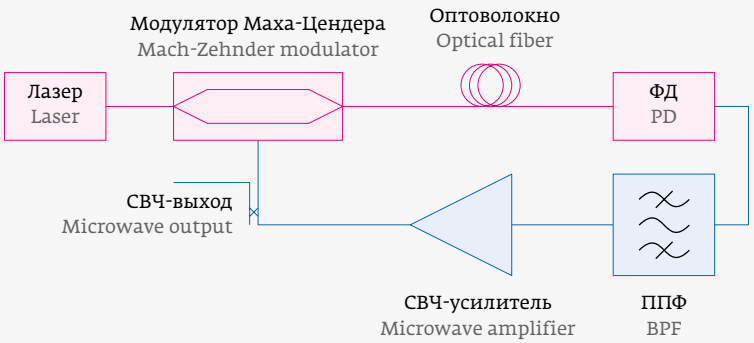

Рис. 10. *Схема ОЭГ с модулятором Маха-Цендера. ФД – фотодетектор, ППФ – полосно-пропускающий фильтр*

Fig. 10. *Scheme of the OEO with the Mach-Zehnder modulator. PD – photodetector, PPF – band-pass filter*

Для генерации монохроматического СВЧ-сигнала необходимо реализовать селекцию резонансных частот. Селекция может быть реализована, например, полосно-пропускающим СВЧ-фильтром. Для перестройки частоты генерации целесообразно использовать перестраиваемые по частоте фильтры. Так, например, в работах [31–35] использовались фильтры на сферах железо-иттриевого граната (ЖИГ) (рис. 11a). Также перестраиваемый СВЧ-фильтр можно сделать на основе эпитаксиальной пленки ЖИГ (рис. 11b). Работа последнего основана на возбуждении, распространении и приеме спиновых волн в пленке [43]. Из-за того, что спиновые волны обладают сравнительно низкой групповой скоростью порядка 10^4–10^6 м/с, такой фильтр, помимо частотной фильтрации сигнала, вносит дополнительное время задержки.

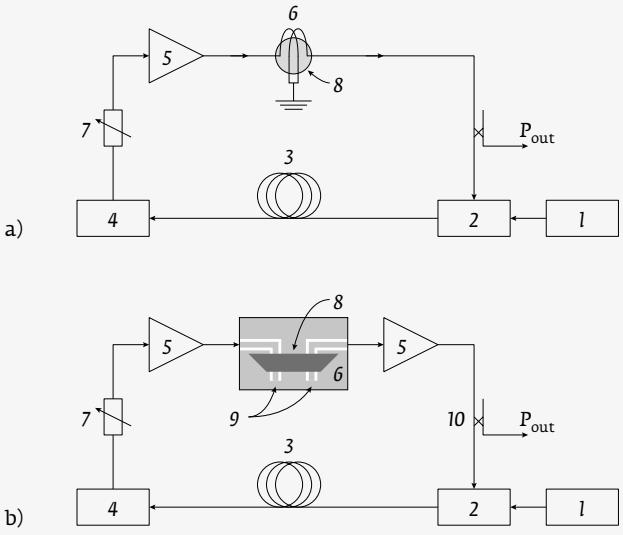

Рис. 11. *Блок-схемы ОЭГ с перестраиваемым СВЧ-фильтра на основе: (а) сферического ЖИГ резонатора, (б) спин-волновой линии задержки. 1 – лазер, 2 – электрооптический модулятор, 3 – оптоволокно, 4 – фотодетектор, 5 – СВЧ-усилитель, 6 – спин-волновой СВЧ-фильтр, 7 – переменный аттенюатор, 8 – эпитаксиальная пленка ЖИГ, 9 – копланарные антенны, 10 – направленный ответвитель*

Fig. 11. *Block diagrams of an OEO with a tunable microwave filter based on: (a) a spherical YIG resonator, (b) a spin-wave delay line. 1 – laser, 2 – electro-optical modulator, 3 – optical fiber, 4 – photodetector, 5 – microwave amplifier, 6 – spin-wave microwave filter, 7 – variable attenuator, 8 – YIG epitaxial film, 9 – coplanar antennas, 10 – directional coupler*

В работе [38] использовался СВЧ-фильтр на касательно намагниченной пленке ЖИГ. Перестройка такого фильтра осуществляется за счет изменения внешнего магнитного поля. На рис. 12 показана перестройка фильтра по частоте в диапазоне 4–12 ГГц за счет увеличения напряженности внешнего магнитного поля.

На рис. 13a показаны характерные спектры фазового шума для спин-волнового оптоэлектронного генератора с длиной оптоволоконной линии задержки 200 м и 4 км, при частоте генерации 10 ГГц. При частоте отстройки 10 кГц величина фазового шума составила –146,5 дБн/Гц. На рис. 13b показана зависимость фазового шума от длины оптоволоконной линии задержки при различных частотах отстройки.

Отличительной особенностью спин-волновых оптоэлектронных генераторов является богатая нелинейная динамика. При высоких уровнях

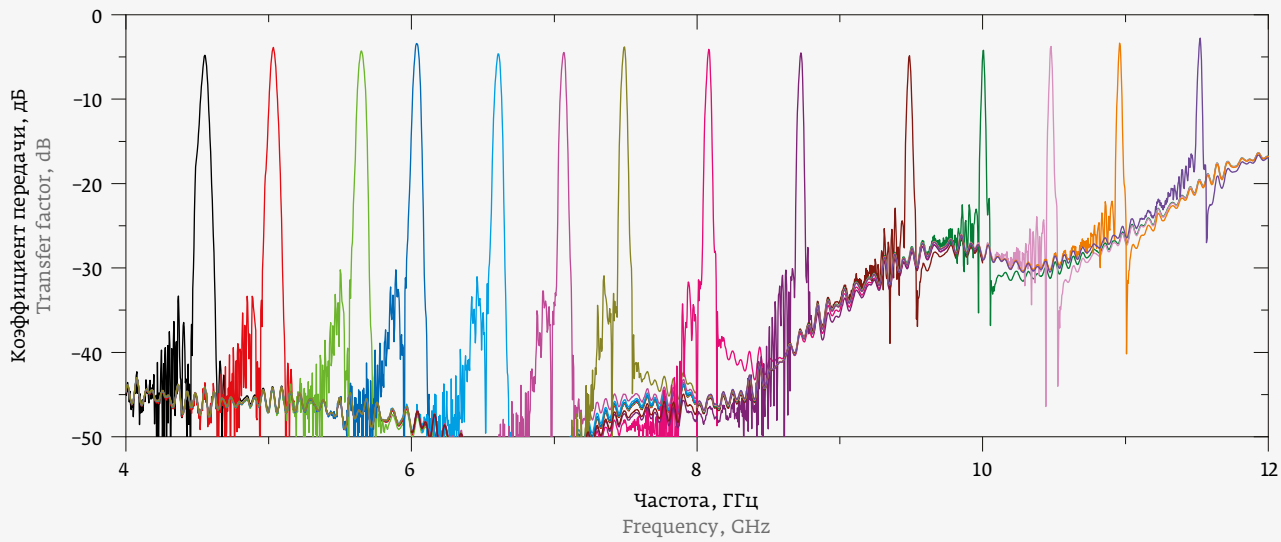

Рис. 12. *Амплитудно-частотные характеристики перестраиваемого спин-волнового фильтра в диапазоне 4,5–11,5 ГГц*
Fig. 12. *Amplitude-frequency characteristics of a tunable spin-wave filter in the range of 4.5-11.5 GHz*

мощности в таких системах развивается генерация периодического сигнала и хаоса [39, 40].

Оптоэлектронный генератор с петлей ФАПЧ был описан в работе [41]. Синхронизация оптоэлектронного генератора с высокостабильным кварцевым генератором при помощи петли ФАПЧ позволяет получить высокостабильный сигнал

modulator, and a band-pass microwave filter is used as a frequency-selective element (Fig. 10). For the first time, such a generator circuit was proposed in [29].

To generate a monochromatic microwave signal, it is necessary to implement the selection of resonant frequencies. Selection can be implemented,

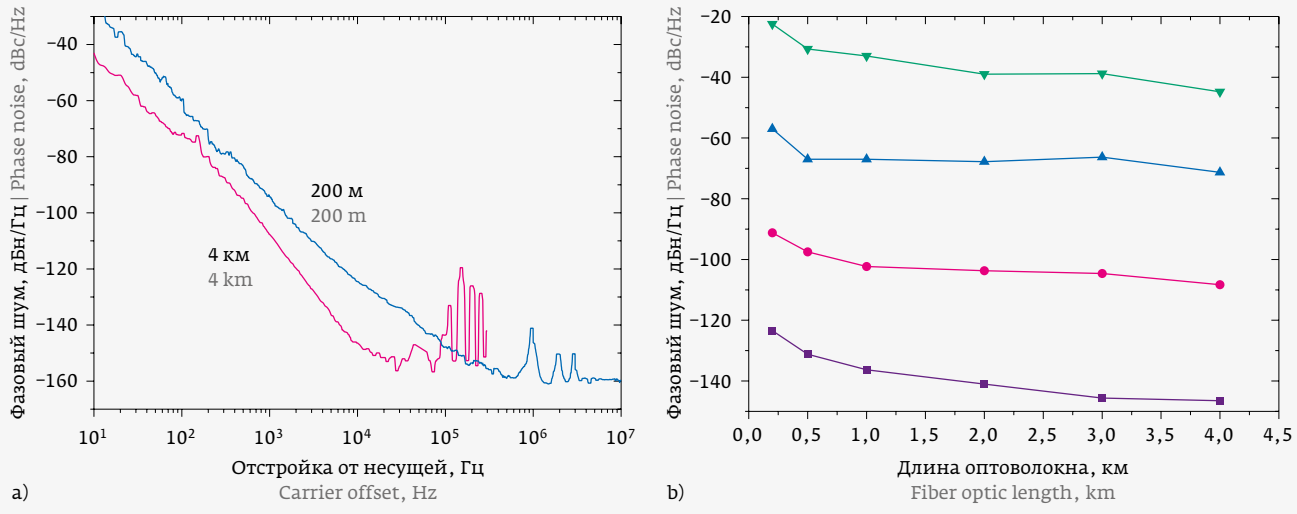

Рис. 13. *Спектры фазового шума спин-волнового оптоэлектронного генератора с длинами оптоволоконных линий задержки 200 м и 4 км (a); Зависимость фазового шума от длины оптоволоконной линии задержки, при различных частотах отстройки (b)*
Fig. 13. *Phase noise spectra of a spin-wave optoelectronic generator with lengths of fiber optic delay lines of 200 m and 4 km (a); Dependence of the phase noise on the length of the optical fiber delay line, at different frequencies of offset (b)*

нал. Температурная нестабильность частоты генерируемого сигнала определяется температурной нестабильностью опорного высокостабильного кварцевого генератора. В диапазоне температур от +5 °C до +40 °C относительная нестабильность оптоэлектронного гетеродина не превышала $3 \cdot 10^{-9}$. Фазовый шум оптоэлектронного генератора с петлей ФАПЧ составил около –140 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от несущей (рис. 14).

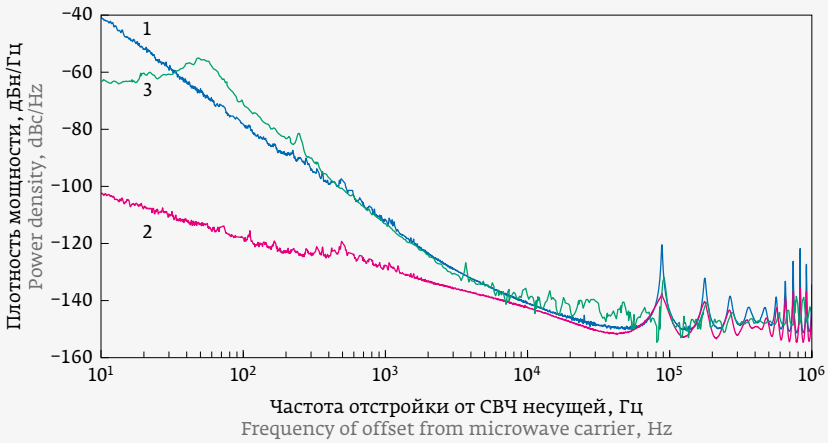

Рис. 14. *Фазовый (1) и амплитудный (2) шум оптоэлектронного генератора без петли ФАПЧ, и фазовый шум (3) оптоэлектронного генератора с петлей ФАПЧ [41]*

Fig. 14. *Phase (1) and amplitude (2) noise of an optoelectronic generator without a PLL loop, and phase noise (3) of an optoelectronic generator with a PLL loop [41]*

Описанные однокольцевые схемы характеризуются тем, что при увеличении длины оптоволоконной линии задержки снижается фазовый шум, но при этом уменьшается интервал между соседними гармониками. Из-за этого повышаются требования к полосе пропускания фильтра для эффективного подавления соседних резонансных частот. Одним из способов решения этой проблемы является использование многокольцевых схем ОЭГ.

4.2. Многокольцевые ОЭГ

Монохроматические СВЧ-генераторы на двухкольцевой схеме, образованной параллельно-соединенными волоконными линиями различной длины, были впервые предложены в работе [42]. На рис. 15a представлена принципиальная схема такого генератора. Волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ), соединенные параллельно, выполняют функцию оптического интерферометра, что позволяет подавить боковые гармоники в спектре кольцевого резонатора. Резонансные частоты кольцевого резонатора, содержащего оптоволокна с временами задержки τ_1, τ_2 ... τ_N определяется следующим образом $f = m/\tau_1 = p/\tau_2 = \ldots = q/\tau_N$ [44–46]. Принцип подавления боковых гармоник показан на рисунке 15b. Резонансные гармоники колец с оптоволокном длиной $10l$, $5l$ и l представлены в верхней части рис. 15b. Видно, что для случаев двухкольцевой схемы, содержащей волокна длиной $10l$ и $5l$, а также $10l$ и l, параллельное подключение дополнительных колец обеспечивает появление нулей передаточной характеристики на частотах, удовлетворяющих условию противо-

for example, with a band-pass microwave filter. To tune the generation frequency, it is advisable to use frequency-tunable filters. Thus, for example, in works [31–35] filters on spheres of yttrium iron garnet (YIG) were used (Fig. 11a). Also, a tunable microwave filter can be made on the basis of an epitaxial YIG film (Fig. 11b). The work of the latter is based on the excitation, propagation and reception of spin waves in a film [43]. Due to the fact that spin waves have a relatively low group velocity of the order of 10^4–10^6 m/s, such a filter, in addition to frequency filtering of the signal, introduces an additional delay time.

The authors of [38] used a microwave filter based on a tangentially magnetized YIG film. Frequency tuning of such a filter is carried out by changing the external magnetic field. Fig. 12 shows the frequency tuning of the filter in the 4–12 GHz range by increasing the strength of the external magnetic field.

Fig. 13a shows typical spectra of phase noise for a spin-wave optoelectronic generator with a fiber optic delay line length of 200 m and 4 km, at a generation frequency of 10 GHz. At a 10 kHz offset frequency, the phase noise was –146.5 dBc/Hz. Fig. 13b shows the dependence of the phase noise on the length of the fiber optic delay line at different offset frequencies.

A distinctive feature of spin-wave optoelectronic generators is their rich nonlinear dynamics. At high power levels in such systems, the generation

фазной интерференции. Трехкольцевая схема, образованная линиями длиной 10*l*, 5*l* и *l*, передаточная характеристика которой показана в нижней части рис. 15b, обеспечивает дополнительное подавление боковых резонансных гармоник и значительно расширяет частотное расстояние между резонансными гармониками [47].

В работе [34] было экспериментально продемонстрировано, что оптоэлектронный генератор на волоконных линиях длиной 4,4 км, 3 км и 1,2 км обеспечивает уровень фазового шума –128 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц при уровене боковых гармоник –93 дБ в диапазоне перестройки несущей частоты от 6 до 12 ГГц. Недостатком подавления боковых частотных гармоник путем параллельного соединения ВОЛЗ является уменьшение суммарной добротности, а следовательно, повышения уровня фазового шума за счет добавления коротких ВОЛЗ, необходимых для подавления побочных гармоник. Так, например, уровень фазового шума в двухкольцевом ОЭГ на ВОЛЗ длиной 8,4 км и 2,2 км (–140 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц) эквивалентен одно-кольцевому ОЭГ на ВОЛЗ длиной 4,4 км (–136 дБ/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц) [34]. Один из способов решения данной проблемы был предложен в работе [48], в которой показано, что контроль коэффициента усиления позволяет подавить боковые гармоники в спектре генерации двух кольцевого ОЭГ на ВОЛЗ длиной 10 км и 1 км. Другим способом подавления боковых гармоник высокодобротного ОЭГ на длинной ВОЛЗ без уменьшения его добротности является использование связанных ОЭГ [49]. В такой конфигурации СВЧ-сигнал, генерируемый малошумящим ОЭГ на длинной ВОЛЗ, ответвляется в ОЭГ на короткой ВОЛЗ, обеспечивая захват частоты и фазы. Полоса пропускания СВЧ-фильтра в ведомом ОЭГ обеспечивает подавление боковых гармоник, положение которых определяется длиной короткой ВОЛЗ. Таким образом, в предложенной конструкции обеспечивается низкий фазовый шум, характерный для ОЭГ на длинной ВОЛЗ, а также относительно большое частотное расстояние между гармониками в спектре генерации, характерное для ОЭГ на коротких ВОЛЗ [50, 51]. Схема такого генератора представлена на рисунке 16. Длина оптоволоконной линии задержки ведущего ОЭГ составляла ~6 км, а ведомого ОЭГ ~50 м. Высокодобротный ведущий ОЭГ определяет спектральные характеристики генерируемого сигнала,

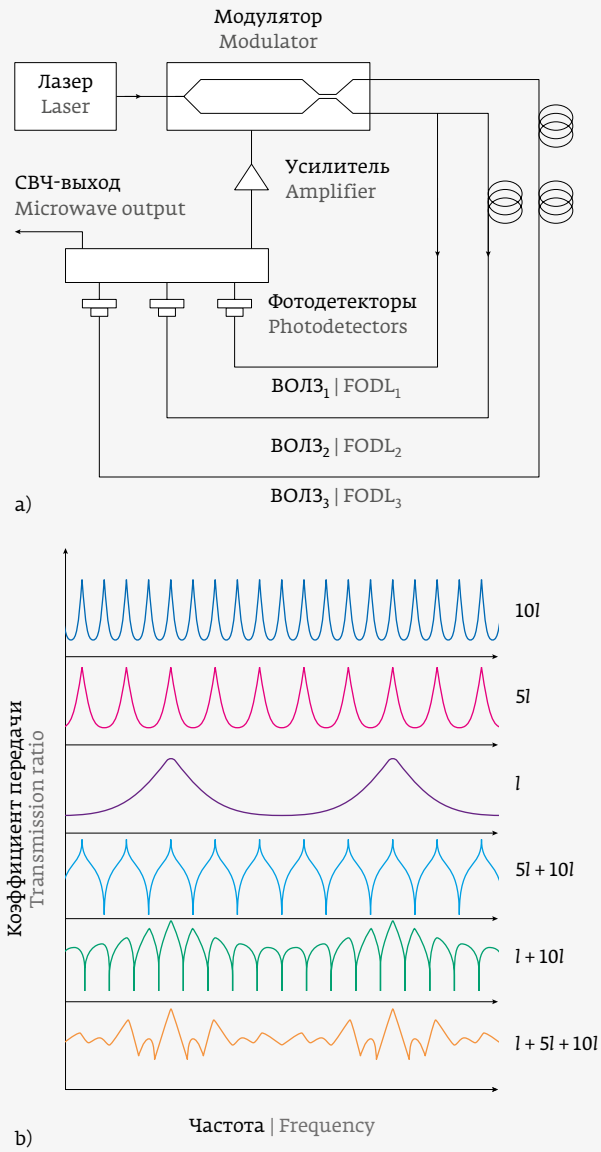

Рис. 15. *Структурная схема оптоэлектронного генератора на параллельном соединении оптоволокн (a), передаточные характеристики однокольцевых, двухкольцевых и трехкольцевой схем на параллельном соединении оптоволокн длиной 10l, 5l и l (b)*

Fig. 15. *Block diagram of an optoelectronic generator on parallel connection of optical fibers (a), transfer characteristics of single-ring, two-ring and three-ring circuits on parallel connection of 10l, 5l and l optical fibers (b)*

of a periodic signal and chaos develops [39, 40]. An optoelectronic oscillator with phase-lock loop (PLL) is described in [41]. Synchronization of the optoelectronic oscillator with a highly stable crystal oscillator using a PLL loop allows a highly stable signal to be obtained. The temperature instability

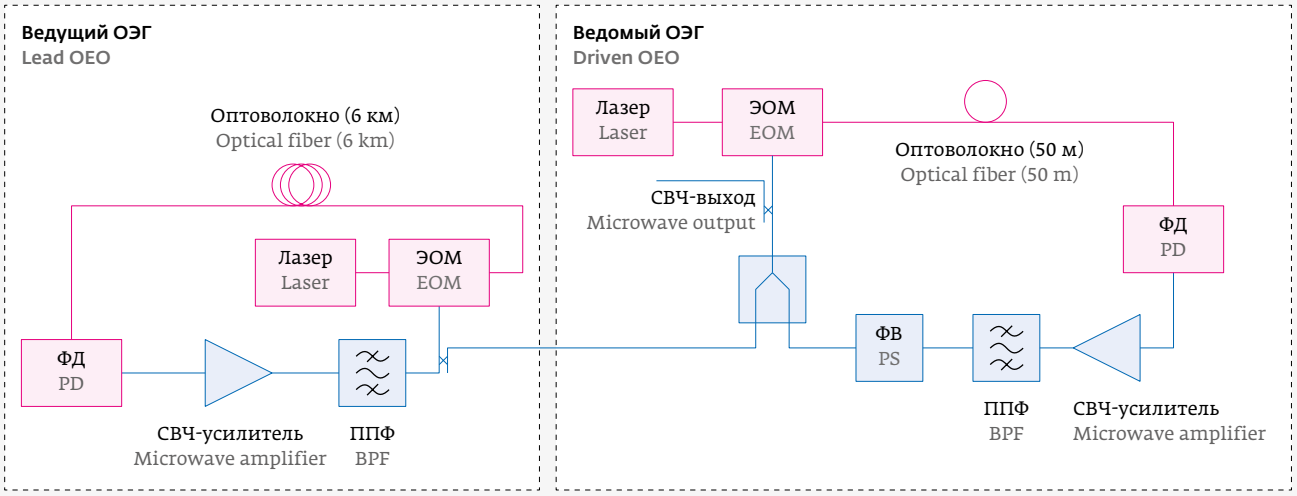

Рис. 16. *Схема двухконтурного ОЭГ с фазовой синхронизацией. ФД – фотодетектор, ППФ – полосно-пропускающий фильтр, ЭОМ – электрооптический модулятор, ФВ – СВЧ фазовращатель*

Fig. 16. *Phase-locked double-circuit OEO. PD – photodetector, BPF – band-pass filter, EOM – electro-optical modulator, PS – microwave phase shifter*

а ведомый ОЭГ используется для выделения генерируемой гармоники [49]. Использование такой схемы с фазовой синхронизацией позволило достичь уровня фазового шума –130 дБн / Гц и –150 дБн / Гц при отстройках 1 кГц и 10 кГц,

of the generated signal frequency is determined by the temperature instability of the reference high-stability crystal oscillator. In the temperature range from + 5 °C to + 40 °C, the relative instability of the optoelectronic heterodyne did not exceed $3 \cdot 10^{-9}$. The

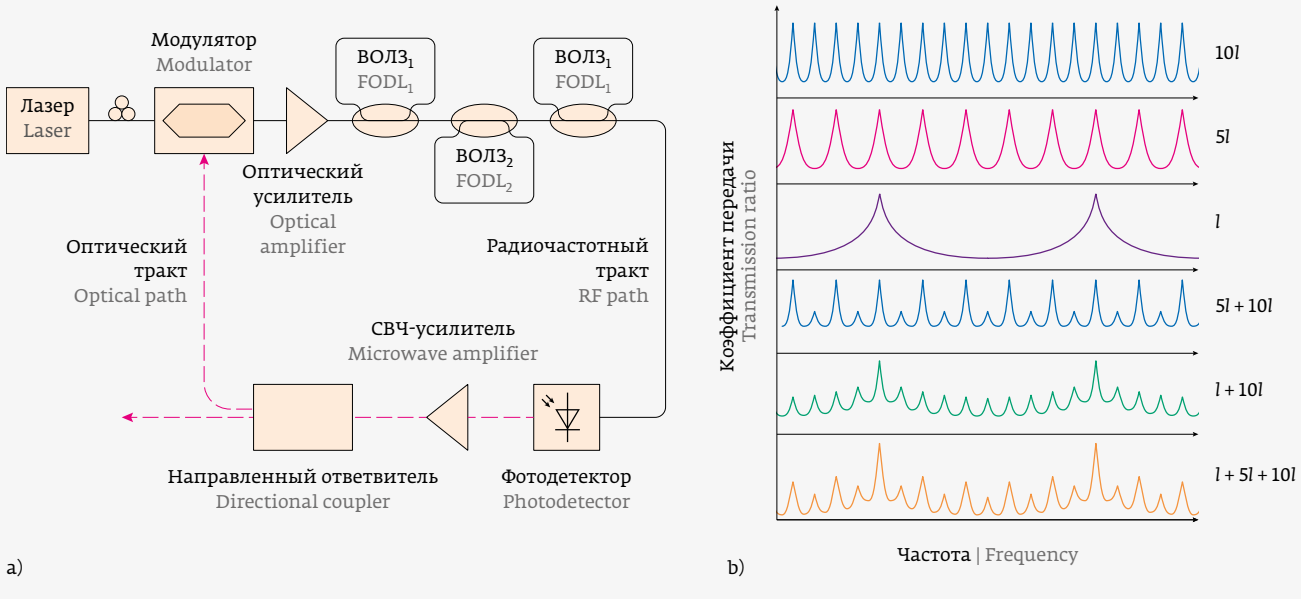

Рис. 17. *Схема многокольцевого ОЭГ на последовательном соединении кольцевых резонаторов (a), передаточные характеристики однокольцевых, двухкольцевых и трехкльцевой схем на последовательном соединении колец длиной 10l, 5l и l (b)*

Fig. 17. *Scheme of a multi-ring OEO on a series connection of ring resonators (a), transfer characteristics of one-ring, two-ring and three-ring schemes on a series connection of rings of length 10l, 5l and l (b)*

соответственно, при уровне подавления ближайшей паразитной гармоники 140 дБ.

Рассмотрим еще один способ подавления боковых гармоник за счет последовательного соединения кольцевых резонаторов [52]. Такая конфигурация представлена на рисунке 17(a) и представляет собой ОЭГ, в оптическом тракте которого к ВОЛЗ подключены несколько дополнительных ВОЛЗ на оптоволокне с поддержкой поляризации, замкнутых в кольцо и выполняющих функции оптических резонаторов [53]. На рис 17b показаны передаточные характеристики однокольцевых, двухкольцевых и трехкольцевой на оптоволокнах длиной 10*l*, 5*l* и *l*. Как видно из этого рисунка, последовательное подключение дополнительных кольцевых резонаторов обеспечивает частотную избирательность резонансных гармоник и, как следствие, увеличение расстояния между резонансными гармониками. Увеличение числа колец приводит к ослаблению тех гармоник, которые не удовлетворяют условию резонанса в каждом из колец [45, 53]. Таким образом, дополнительные кольца выполняют частотно-селективную функцию, не уменьшая при этом общую добротность схемы, а следовательно, не увеличивая уровень фазового шума [46, 54].

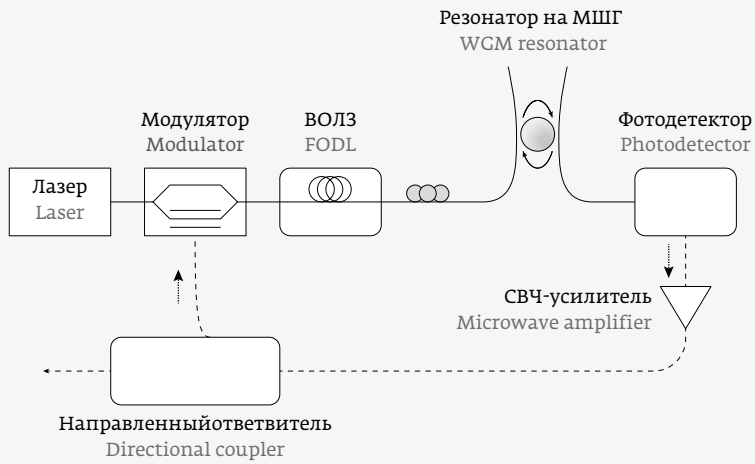

Рис. 18. *Схема ОЭГ на ВОЛЗ с использованием резонатора с МШГ [58]*
Fig. 18. *Schematic of an OEO based on a FODL using a WGM resonator [58]*

Кроме того, в качестве узкополосного фильтра в схемах таких ОЭГ вместо фильтров на кольцевых ВОЛЗ можно использовать оптические резонаторы с МШГ [55–57]. В работе [58] исследован оптоэлектронный генератор на ВОЛЗ, в котором резонатор с МШГ используется в качестве частотно-селективного элемента. Схематическое изображение такого ОЭГ приведено на рис. 18. В работе [58] проведены экспериментальные исследования трех конструкций: ОЭГ только на оптоволокне длиной 4 км; ОЭГ только на резонаторе с МШГ из MgF_2 с нагруженной добротностью $1{,}68 \cdot 10^8$; ОЭГ на ВОЛЗ и на резонаторе с МШГ. В результате показано, что введение в оптический тракт резонаторов с МШГ обеспечивает подавление боковых гармоник до уровня –53 дБ при сохранении уровня фазового шума, характерного для ОЭГ на оптоволокне, который соста-

phase noise of the optoelectronic generator with a PLL loop was about –140 dBc/Hz at 10 kHz offset from the carrier (Fig. 14).

The described single-ring circuits are characterized by the fact that with an increase in the length of the optical fiber delay line, the phase noise decreases, but at the same time the interval between adjacent harmonics decreases. This increases the bandwidth requirements of the filter to effectively suppress adjacent resonant frequencies. One of the ways to solve this problem is to use multi-ring OEO circuits.

4.2. Multi-ring OEO

Monochromatic microwave oscillators based on a two-ring circuit formed by parallel-connected fiber lines of various lengths were first proposed in [42]. Fig. 15 (a) shows a schematic diagram of such a generator. Fiber-optic delay lines (FODLs), connected in parallel, act as an optical interferometer, which makes it possible to suppress lateral harmonics in the spectrum of the ring resonator. The resonant frequencies of a ring resonator containing optical fibers with delay times τ_1, τ_2 … τ_N is determined as follows $f = m/\tau_1 = p/\tau_2 = \ldots = q/\tau_N$ [44–46]. The principle of suppression of lateral harmonics is shown in Fig. 15 (b). The resonant harmonics of rings with optical fibers of lengths 10*l*, 5*l* and *l*, are shown in the upper part of Fig. 15 (b). It can be seen that for the cases of a two-ring circuit containing fibers of length 10*l* and 5*l*, as well as 10*l* and *l*, parallel connection of additional rings provides

вил –124 дБн/Гц при отстройке 10 кГц он частоты генерации 6,25 ГГц.

4.3. ОЭГ с оптическим усилением

Одним из основных источников шума в оптоэлектронном генераторе является СВЧ-усилитель, который используется для компенсации потерь в схеме. Поэтому для снижения фазовых шумов генератора можно использовать оптический усилитель на легированном эрбием волокне. На рис. 19 показана схема генератора с оптическим усилителем [59].

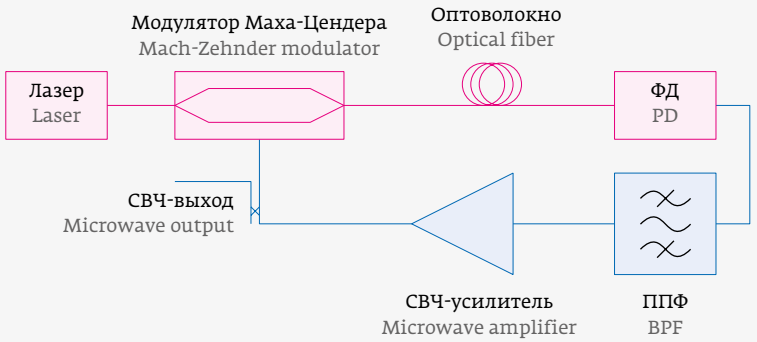

Рис. 19. *Схема оптоэлектронного генератора с оптическим усилителем*
Fig. 19. *Diagram of an optoelectronic generator with an optical amplifier*

В работе [59] проведено сравнение спектра фазовых шумов для конфигураций ОЭГ с оптическим и СВЧ-усилителями на частоте генерации 10 ГГц. Показано, что в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц уровень фазовых шумов генератора с оптическим усилителем на 10–15 дБн/Гц ниже, чем у генератора с СВЧ-усилителем. В работе [60] представлены результаты исследования оптического усилителя на легированном эрбием волокне для использования в оптоэлектронном генераторе СВЧ на линиях задержки вместо СВЧ-усилителя с низким фазовым шумом. Частота генерации составляла 8 ГГц, длина легированного эрбием волокна 10 м. При отстройках от несущей 10 и 100 Гц, фазовый шум составил –50 и –85 дБн/Гц, соответственно. При отстройках 1 и 10 кГц фазовый шум имел значения –110 и –130 дБн/Гц.

4.4. Промышленные ОЭГ фирмы OEwaves

Коммерческим производством оптоэлектронных генераторов в модульном и интегральном исполнении занимается компания OEwaves. Согласно информации с сайта компании www.oewaves.com на 2020 год, ОЭГ в модульном исполнении имеет фазовый шум –138 дБн/Гц, при отстройке 10 кГц от несущей, а доступные частоты генерации находятся в диапазоне 8–12 ГГц. Для интегрального ОЭГ (частота генерации 28–36 ГГц) фазовый шум составляет –110 дБн/Гц, при отстройке 10 кГц от несущей. Также фирма OEwaves выпускает лабораторные ОЭГ, которые можно вмонтировать в телекоммуникационную стойку шириной 19 дюймов (48,26 см). Фазовый шум лабораторного ОЭГ составляет –163 дБн/Гц при отстройке 6 кГц, и около –155 дБн/Гц при

the appearance of transfer characteristic zeros at frequencies satisfying the condition of antiphase interference. A three-ring circuit formed by lines of length 10*l*, 5*l* and *l*, the transfer characteristic of which is shown in the lower part of Fig. 15 (b), provides additional suppression of lateral resonant harmonics and significantly expands the frequency distance between resonant harmonics [47].

In [34], it was experimentally demonstrated that an optoelectronic oscillator based on fiber lines 4.4 km, 3 km, and 1.2 km in length provides a phase noise level of –128 dBc/Hz at 10 kHz offset from the carrier at a side harmonic level of –93 dB in the carrier frequency tuning range from 6 to 12 GHz. The disadvantage of suppressing lateral frequency harmonics by parallel connection of FODLs is a decrease in the total Q-factor, and, consequently, an increase in the phase noise level, due to the addition of short FODLs necessary to suppress spurious harmonics. So, for example, the level of phase noise in a two-ring OEO on a FODL with a length of 8.4 km and 2.2 km (–140 dBc/Hz with a offset from the carrier at 10 kHz) is equivalent to a single-ring OEO on a FODLs with a length of 4.4 km (–136 dB/Hz at 10 kHz offset from the carrier) [34]. One of the ways to solve this problem was proposed in [48], in which it was shown that control of the gain makes it possible to suppress the lateral harmonics in the generation spectrum of two ring OEO on FODL 10 km and 1 km long. Another way to suppress the lateral harmonics of a high-Q OEO on a long FODLwithout decreasing its Q-factor is to use coupled OEO [49]. In this configuration, the microwave signal generated by the low-noise OEO on the long FODL is branched off into the OEO on the short FODL, providing frequency and phase locking. The passband of the microwave filter

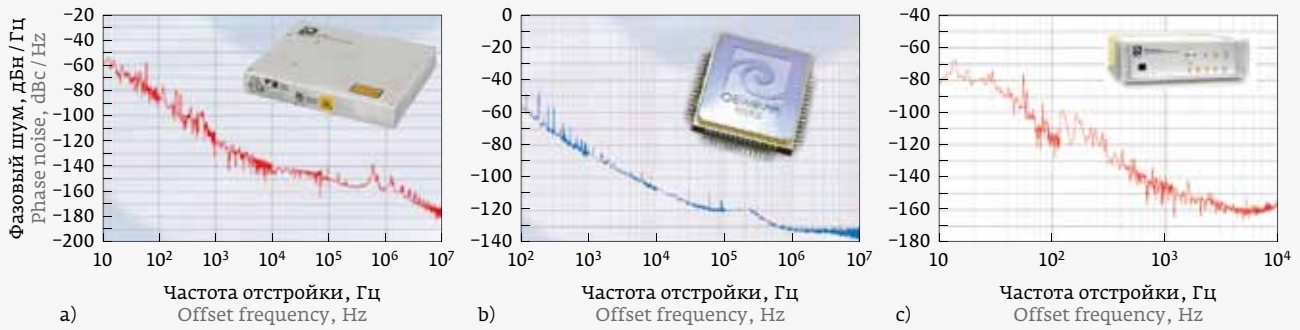

Рис. 20. *Фазовые шумы оптоэлектронных генераторов фирмы OEwaves в модульном (a) и интегральном (b) исполнениях, а также лабораторный ОЭГ (c). Размеры модульного ОЭГ: 10,16 × 12,7 × 2,4 см; интегрального ОЭГ: 1,5 × 1,5 × 0,4 см. Длина и высота лабораторного ОЭГ зависит от спецификации; ширина 48,26 см.*

Fig. 20. *Phase noises of OEwaves optoelectronic generators in modular (a) and integral (b) versions, as well as laboratory OEG (c). Dimensions of the modular OEO: 10.16 × 12.7 × 2.4 cm; integral OEO: 1.5 × 1.5 × 0.4 cm. The length and height of the laboratory OEG depends on the specification; width 48.26 cm.*

отстройке 10 кГц. Фотографии предлагаемых генераторов и их характеристики приведены на рис. 20.

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ ШУМОВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

В этом заключительном разделе приводятся основные результаты, достигнутые к настоящему моменту времени в области разработки ОЭГ. Представлены генераторы, обладающие наиболее низким фазовым шумом. Генераторы делятся по частотному диапазону генерации СВЧ-сигнала.

В диапазоне 1–8 ГГц наименьшим фазовым шумом обладает оптоэлектронный генератор с перестройкой частоты генерации, в котором используется линия задержки на пленке ЖИГ в качестве частотно-селективного элемента (полосно-пропускающий фильтр на поверхностных спиновых волнах) [38]. При отстройке 10 кГц фазовый шум генератора составил –146 дБн/Гц. Такие низкие значения фазового шума были получены за счет использования малошумящих компонентов и оптоволоконной линии задержки длиной 4 км.

В работе [61] описан ОЭГ с частотой генерации 10 ГГц, и обладающий наименьшим фазовым шумом в диапазоне 8–12 ГГц. Значения фазового шума составили –163 дБн/Гц при отстройке 6 кГц и около –155 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от несущей. Как и в предыдущем случае, в конструкции

in the slave OEO provides suppression of lateral harmonics, the position of which is determined by the length of the short FODL. Thus, the proposed design provides low phase noise, which is typical for OEO on a long FODL, as well as a relatively large frequency distance between harmonics in the generation spectrum, which is typical for OEO on short FODLs [50, 51]. The diagram of such a generator is shown in Fig. 16. The length of the fiber-optic delay line of the master OEO was ~6 km, and the slave OEO was ~50 m. The high-Q master OEO determines the spectral characteristics of the generated signal, and the slave OEO is used to isolate the generated harmonic [49]. The use of such a phase-locked circuit made it possible to achieve a phase noise level of –130 dBc/Hz and –150 dBc/Hz at 1 kHz and 10 kHz offsets, respectively, at a level of suppression of the nearest parasitic harmonic of 140 dB.

Let us consider one more method for suppressing side harmonics due to series connection of ring resonators [52]. Such a configuration is shown in Fig. 17a and is an OEO, in the optical path of which several additional FODLs are connected to the FODL with polarization support, closed in a ring and performing the functions of optical resonators [53]. Fig. 17b shows the transfer characteristics of single-ring, double-ring and three-ring on 10*l*, 5*l* and *l* optical fibers. As can be seen from this figure, the series connection of additional ring resonators provides frequency selectivity of resonant harmonics and, as a consequence, an increase in the

генератора использованы малошумящие компоненты, а также оптоволоконная линия задержки длиной 16 км.

В работах [62–64] представлены перестраиваемые оптоэлектронные генераторы с частотой генерации выше 10 ГГц. В работе [62] была показана генерация сигнала частотой от 8,28 ГГц до 25 ГГц, с фазовым шумом ниже –120 дБн/Гц при отстройке 10 кГц. У оптоэлектронного генератора, перестраиваемого в диапазоне 8–14 ГГц [63], фазовый шум при отстройке 10 кГц составил –121 дБн/Гц. У ОЭГ, представленного в работе [64], наименьший фазовый шум составлял –123 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от частоты генерации 13,2 ГГц. Фазовый шум при этой же отстройке на других частотах генерации в диапазоне 8,6–15,2 ГГц не превышал –111 дБн/Гц.

В диапазоне частот 18–27 ГГц наиболее низким фазовым шумом обладает оптоэлектронный генератор, показанный в работе [65]. Главной особенностью этого генератора является использование фазовой автоподстройки частоты. При отстройке 10 кГц от несущей фазовый шум составил –134 дБн/Гц.

Для Ка (27–40 ГГц) и W (75–110 ГГц) диапазонов наименьшим фазовым шумом обладает ОЭГ, представленный в работе [66], который содержит две связанные кольцевые схемы (оптическую и электрическую). Представленный генератор позволяет получить сигналы частотой 30 и 90 ГГц. Фазовый шум при отстройке 10 кГц составил –130 дБн/Гц (30 ГГц) и –120 ГГц (90 ГГц).

Генератор, представленный в работе [67], на частоте генерации 51 ГГц имеет фазовый шум –105 дБн/Гц при отстройке 10 кГц от несущей. На данный момент времени это наименьшее значение фазового шума для генераторов, работающих в диапазоне 40–75 ГГц.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Госзадание», грант № FSEE-2020-0005).

REFERENCES

28. **Belkin M., Loparev A.** Optoelectronic generator is the first practical device of microwave optoelectronics. *Electronics: Science, technology, business*. 2010; 6: 62–71.
29. **Yao X. S., Maleki L.** High frequency optical subcarrier generator. *Electronics Letters*. 1994; 30(18): 1525–1526.
30. **Yao X. S., Maleki L.** Optoelectronic microwave oscillator. *JOSA B*. 1996; 13(8): 1725–1735.
31. **Eliyahu D., Maleki L.** Tunable, ultra-low phase noise YIG based optoelectronic oscillator. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2003*. – IEEE. 2003; 3: 2185–2187.

distance between resonant harmonics. An increase in the number of rings leads to a weakening of those harmonics that do not satisfy the resonance condition in each of the rings [45, 53]. Thus, additional rings perform a frequency-selective function without decreasing the overall Q-factor of the circuit and, consequently, without increasing the phase noise level [46, 54].

Besides, optical resonators with WGMs can be used as a narrow-band filter in the schemes of such OEOs instead of filters based on ring FODLs [55–57]. In [58], an optoelectronic generator based on a FOLZ was investigated, in which a resonator with a WGM is used as a frequency selective element. A schematic representation of such an OEO is shown in Fig. 18. In [58], experimental studies of three designs were carried out: OEO only on optical fiber 4 km long; OEO only on a resonator with a WGM made of MgF_2 with a loaded Q-factor of $1.68 \cdot 10^8$; OEO on FODL and on a resonator with WGM. As a result, it was shown that the introduction of resonators with WGMs into the optical path ensures the suppression of side harmonics to a level of –53 dB while maintaining the phase noise level characteristic of OEO on optical fiber, which was –124 dBc/Hz at a 10 kHz offset of the generation frequency of 6.25 GHz.

4.3. OEO with optical amplification

One of the main sources of noise in an optoelectronic generator is the microwave amplifier, which is used to compensate for losses in the circuit. Therefore, to reduce the phase noise of the generator, an optical amplifier based on erbium-doped fiber can be used. Figure 19 shows a schematic of an oscillator with an optical amplifier [59].

In [59], a comparison of the phase noise spectrum for OEO configurations with optical and microwave amplifiers at a generation frequency of 10 GHz was carried out. It is shown that in the range from 100 Hz to 100 kHz, the phase noise level of a generator with an optical amplifier is 10–15 dBc/Hz lower than that of a generator with a microwave amplifier. Paper [60] presents the results of a study of an optical amplifier based on erbium-doped fiber for use in an optoelectronic microwave generator based on delay lines instead of a microwave amplifier with low phase noise. The generation frequency was 8 GHz, the length of the erbium-doped fiber was 10 m. At 10 and 100 Hz offsets from the carrier, the phase noise was –50 and –85 dBc/Hz, respectively. At 1 and 10 kHz offsets, the phase noise was –110 and –130 dBc/Hz.

32. **Belkin M. E., Loparev A. V.** Optoelectronic microwave signal generator: modeling, investigation of spectral and noise characteristics. *Nano and microsystem technology*. 2011; 9: 29–33.
33. **Belkin M. E., Sigov A. S.** A NEW DIRECTION OF PHOTONICS ULTRA-FREQUENCY OPTOELECTRONICS. *Radio Engineering and Electronics*. 2009; 54(8): 901–914.
34. **Eliyahu D., Maleki L.** Low phase noise and spurious level in multi-loop opto-electronic oscillators.IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. *Proceedings of the 2003. IEEE*. 2003; 405–410.
35. **Belkin M. E. et al.** Tunable RF–band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer–added design model for its simulation. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2011; 53(11): 2474–2477.
36. **Chembo Y. K. et al.** Optoelectronic oscillators with time-delayed feedback. *Reviews of Modern Physics*. 2019; 91(3): 035006.
37. **Tang Z. et al.** Tunable optoelectronic oscillator based on a polarization modulator and a chirped FBG. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012; 24(17): 1487–1489.
38. **Ustinov A. B. et al.** A tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*. – *IOP Publishing*. 2019; 1326. – No. 1. – P. 012015.
39. **Xiong Y. et al.** Experimental parameters, combined dynamics, and nonlinearity of a magnonic-opto-electronic oscillator (MOEO). *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91(12): 125105.
40. **Ustinov A. B. et al.** Self-generation of chaotic microwave signal in spin wave optoelectronic generator. *Physics of the Solid State*. 2018; 60(11): 2127–2131.
41. **Chizh A. L., Mikitchuk K. B., Skotorenko I. V.** Optoelectronic reference generator of the X-frequency range for radar systems. *Quantum Electronics*. 2021; 51(3): 254–259.
42. **Yao X. S., Maleki L.** Multiloop optoelectronic oscillator. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2000; 36(1): 79–84.
43. **Kalinikos B. A., Ustinov A. B., Baruzdin S. A.** Spin-wave devices and echo-processors. *Radiotekhnika*. 2013. 216 p.
44. **Nikitin A. A. et al.** Theory of resonant frequency spectrum of tunable multi-loop spin-wave optoelectronic oscillators. 2017. 47-th European Microwave Conference (EuMC). IEEE. 2017; 1108–1111.
45. **Vitko V. V. et al.** General Theory of the Resonant Spectrum of Multi-ring Resonators. 2019 *PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium-Spring* (PIERS-Spring). – IEEE. 2019; 2018–2024.
46. **Vitko V. V. et al.** Tunable multi-loop optoelectronic microwave resonators. 2017 *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. – IEEE. 2017; 1–4.
47. **Bánky T., Horváth B., Berceli T.** Optimum configuration of multiloop optoelectronic oscillators. *JOSA B*. 2006; 23 (7): 1371–1380.
48. **Cho J. H., Kim H., Sung H. K.** Reduction of spurious tones and phase noise in dual-loop OEO by loop-gain control. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2015; 27(13): 1391–1393.
49. **Zhou, W., Blasche G.** «Injection-locked dual opto-electronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level.» *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 53.3 (2005): 929–933.
50. **Okusaga O. et al.** Spurious mode reduction in dual injection-locked optoelectronic oscillators. *Optics express*. 2011; 19(7): 5839–5854.
51. **Hong J. et al.** Comparison of both type injection locked and parallel dual-loop OEO. *Optik*. 2015; 126(23): 4410–4413.
52. **Liu X. et al.** A reconfigurable optoelectronic oscillator based on cascaded coherence-controllable recirculating delay lines. *Optics express*. 2012; 20(12): 13296–13301.
53. **Vitko V. V. et al.** Theory of optoelectronic oscillators based on serially coupled multiple micro-ring resonators. *2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo)*. – IEEE. 2017; 100–103.
54. **Saleh K. et al.** Optical scattering noise in high Q fiber ring resonators and its effect on optoelectronic oscillator phase noise. *Optics letters*. 2012; 37(4): 518–520.
55. **Matsko A. B., Ilchenko V. S.** Optical resonators with whispering-gallery modes-part I: basics. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*. 2006;12(1): 3–14.
56. **Ilchenko V. S., Matsko A. B.** Optical resonators with whispering-gallery modes-part II: applications. *IEEE Journal of selected topics in quantum*

4.4. Industrial OEOs from OEwaves

OEwaves is a commercial manufacturer of modular and integrated optoelectronic oscillators. According to information from the company's website www.oewaves.com for 2020, the OEO in modular design has a phase noise of –138 dBc/Hz, at 10 kHz offset from the carrier, and the available oscillation frequencies are in the range of 8–12 GHz. For an integrated OEO (generation frequency 28–36 GHz), the phase noise is –110 dBc/Hz, at 10 kHz offset from the carrier. Also, OEwaves manufactures laboratory OEOs that can be mounted in a 19" (48.26 cm) wide telecommunication rack. The phase noise of the laboratory OEO is –163 dBc/Hz at 6 kHz offset, and about –155 dBc/Hz at 10 kHz offset. Photos of the proposed generators and their characteristics are shown in Fig. 20.

5. COMPARISON OF PHASE NOISE OF OPTOELECTRONIC OSCILLATORS OF VARIOUS TYPES

This final section summarizes the main results achieved to date in the development of OEO. Oscillators with the lowest phase noise are presented. They are divided according to the frequency range of microwave signal generation.

In the 1–8 GHz range, the lowest phase noise is possessed by an optoelectronic oscillator with frequency tuning, in which a delay line on a YIG film is used as a frequency-selective element (a band-pass filter based on surface spin waves) [38]. At 10 kHz offset, the phase noise of the generator was –146 dBc/Hz. These low phase noise values have been achieved through the use of low noise components and a 4 km fiber optic delay line.

Paper [61] describes an OEO with a generation frequency of 10 GHz and having the lowest phase noise in the 8–12 GHz range. The phase noise values were –163 dBc/Hz at 6 kHz offset and about –155 dBc/Hz at 10 kHz offset from the carrier. As in the previous case, the design of the generator uses low-noise components, as well as a fiber-optic delay line with a length of 16 km.

In papers [62–64], tunable optoelectronic generators with a generation frequency above 10 GHz are presented. [62] showed the generation of a signal with frequencies from 8.28 GHz to 25 GHz, with phase noise below –120 dBc/Hz at 10 kHz offset. For an optoelectronic oscillator tunable in the 8–14 GHz range [63], the phase noise at 10 kHz offset was –121 dBc/Hz. The OEO presented in [64] had the lowest phase noise of –123 dBc/Hz at 10 kHz offset from the generation frequency of 13.2 GHz.

VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ «ВКВО-2021»

Пермь, 5-8 октября 2021 г.

Регистрация до 10 сентября 2021 г.
на сайте: www.fibopt.ru/rfo2021/

Тематика конференции

- Волоконные световоды;
- Волоконно-оптические кабели;
- Волоконно-оптические системы связи и передачи информации;
- Компоненты и устройства волоконной оптики;
- Волоконные лазеры и усилители;
- Волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин;
- Наноматериалы и нанотехнологии в волоконной оптике;
- Агробиофотоника;
- Медицинская фотоника;
- Нанофотоника;
- Фотонные интегральные схемы и радиофотоника;
- Другие актуальные вопросы современной волоконной оптики и смежных областей.

Организаторы

ПНППК

НЦВО РАН

ЦЕНТР НТИ ФОТОНИКА

Спонсоры

специальные системы ФОТОНИКА

OPTOGEAR

Инфопартнеры

ФОТОНИКА

FAST MILE ПЕРВАЯ МИЛЯ

electronics. 2006; 12(1): 15–32.
57. **Eliyahu D. et al.** Resonant widely tunable opto-electronic oscillator. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013; 25 (15): 1535–1538.
58. **Saleh K. et al.** Phase noise performance comparison between optoelectronic oscillators based on optical delay lines and whispering gallery mode resonators. *Optics express*. 2014; 22(26): 32158–32173.
59. **Devgan P. S. et al.** Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photonic gain. *Journal of Lightwave Technology*. 2009; 27(15): 3189–3193.
60. **Mikitchuk K. B., Chizh A. L., Malyshev S. A.** Optical amplifier based on erbium-doped fiber for an optoelectronic microwave oscillator on delay lines. *Electronics and Microelectronics of Microwave*. – 2017. – Vol. 1. – P. 104–108.
61. **Eliyahu D., Seidel D., Maleki L.** Phase noise of a high performance OEO and an ultra low noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system. *2008 IEEE International Frequency Control Symposium*. – IEEE. 2008; 811–814.
62. **Peng H. et al.** Wideband tunable optoelectronic oscillator based on the deamplification of stimulated Brillouin scattering. *Optics Express*. 2017; 25(9): 10287–10305.
63. **Xiao K. et al.** Tunable OEO-based photonic RF receiver with image frequency rejection. *Applied optics*. 2019; 58(8): 2127–2131.
64. **Chen G. et al.** Frequency-tunable OEO using a DFB laser at period-one oscillations with optoelectronic feedback. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018; 30(18): 1593–1596.
65. **Bluestone A. et al.** An ultra-low phase-noise 20-GHz PLL utilizing an optoelectronic voltage-controlled oscillator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015; 63(3): 1046–1052.
66. **Ly A. et al.** Highly spectrally pure 90-GHz signal synthesis using a coupled optoelectronic oscillator. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2018; 30(14): 1313–1316.
67. **Bagnell M., Davila-Rodriguez J., Delfyett P. J.** Millimeter-wave generation in an optoelectronic oscillator using an ultrahigh finesse etalon as a photonic filter. *Journal of lightwave technology*. 2013; 32(6): 1063–1067.

АВТОРЫ

Устинов Алексей Борисович, д. ф.-м. н., кафедра физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; ustinov-rus@mail.ru, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-7382-9210

Никитин Андрей Александрович, к. ф.-м. н., кафедра физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; e-mail: and.a.nikitin@gmail.com, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-4226-4341

Кондрашов Александр Викторович, к. ф.-м. н., кафедра физической электроники и технологии СПбГЭТУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-4192-4480

Таценко Иван Юрьевич, аспирант, кафедра физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0001-6320-9352

Шамрай Александр Валерьевич, д. ф.-м. н., e-mail: Achamrai@mail.ioffe.ru, зав. лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-0292-8673

Иванов Андрей Викторович, начальник отдела, АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», Москва, Россия

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

The phase noise at the same offset at other lasing frequencies in the range of 8.6–15.2 GHz did not exceed –111 dBc / Hz.

In the frequency range 18–27 GHz, the optoelectronic generator shown in [65] has the lowest phase noise. The main feature of this generator is the use of phase-locked loop frequency. At 10 kHz offset from the carrier, the phase noise was –134 dBc / Hz.

For Ka (27–40 GHz) and W (75–110 GHz) bands, the OEO presented in [66] has the lowest phase noise, which contains two coupled ring circuits (optical and electrical). The presented oscillator allows you to generate signals with frequencies of 30 and 90 GHz The phase noise at 10 kHz offset was –130 dBc / Hz (30 GHz) and –120 GHz (90 GHz).

The generator presented in [67] at a generation frequency of 51 GHz has a phase noise of –105 dBc / Hz at 10 kHz offset from the carrier. At present time, this is the lowest phase noise value for generators operating in the 40–75 GHz range.

This work was partially financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment project, grant No. FSEE-2020-0005).

ABOUT AUTHORS

Alexey B. Ustinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading researcher, Department of Physical Electronics and Technology, Electrotechnical University, ETU «LETI», St. Petersburg Russia.
ORCID: 0000-0002-7382-9210

Nikitin Andrey Aleksandrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physical Electronics and Technology, ETU «LETI»; e-mail: and.a.nikitin@gmail.com, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-4226-4341

Kondrashov Alexander Viktorovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Department of Physical Electronics and Technology, ETU «LETI», St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-4192-4480

Tatsenko Ivan Yurievich, postgraduate student, Department of Physical Electronics and Technology, ETU «LETI», St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0001-6320-9352

Shamrai Alexander Valerievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, e-mail: Achamrai@mail.ioffe.ru, Head. lab. of Quantum Electronics Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-0292-8673

Ivanov Andrey Viktorovich, Head of Department, JSC «Research Institute «Polyus» named after M. F. Stelmakh», Moscow, Russia

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

+7 (499) 750-08-28
weldex@hyve.group

Официальная поддержка: МИНПРОМТОРГ РОССИИ, ММАГС, Ассоциация Эксвар

Генеральный информационный партнер: Журнал «Сварочное производство»

Hyve