



# Принципы построения оптоэлектронных СВЧ генераторов

А. Б. Устинов<sup>1</sup>, И. Ю. Таценко<sup>1</sup>, А. А. Никитин<sup>1</sup>,  
А. В. Кондрашов<sup>1</sup>, А. В. Шамрай<sup>2</sup>, А. В. Иванов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», Москва, Россия

**Статья знакомит читателей с принципами создания оптоэлектронных СВЧ-генераторов. Не претендуя на полноту охвата, авторы анализируют основные типы генераторов, классифицируя их по принципу действия. Кратко рассмотрены физические процессы, лежащие в основе работы различных типов генераторов. Приведено сравнение характеристик генераторов.**

**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

## ВВЕДЕНИЕ

Оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала являются одним из основных устройств радиофотоники, который представляет огромный научный и практический интерес. ОЭГ находят свое применение в изучении нелинейной динамики электромагнитных волн в оптическом и СВЧ-диапазонах. Они находят важное практическое применение для оптических систем связи, генерации сверхстабильных СВЧ-сигналов, радиолокационных систем, генерации оптического хаоса и многих других. Главной особенностью ОЭГ является одновременное использование оптических и электрон-

# Principles of Constructing Optoelectronic Microwave Oscillators

A. B. Ustinov<sup>1</sup>, I. Yu. Tatsenko<sup>1</sup>, A. A. Nikitin<sup>1</sup>, A. V. Kondrashov<sup>1</sup>,  
A. V. Shamray<sup>2</sup>, A. V. Ivanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> A. F. Ioffe Physical and Technical Institute of RAS, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> M. F. Stelmakh Research Institute "Polyus" JSC, Moscow, Russia

The article confronts the readers with the principles of creating optoelectronic microwave generators. Without pretending to be complete, the authors analyze the main types of generators, classifying them according to their principle of operation. The physical processes underlying the operation of various types of generators are briefly considered. A comparison of the characteristics of the generators is given.

**Key words:** Optoelectronic oscillator, Microwave Generator, Optical frequency comb, Integrated ring resonators

Received on: 15.04.2021

Accepted on: 11.05.2021

## INTRODUCTION

Optoelectronic oscillators (OEOs) generating of a microwave signal are one of the main devices in microwave photonics, which are of great scientific and practical interest. OEOs find their application in the study of nonlinear dynamics of electromagnetic waves in the optical and microwave ranges. They find important practical applications for optical communication systems, generation of ultra-stable microwave signals, radar systems, generation of optical chaos, and many others. The main feature of the OEO is the simultaneous use of optical and electronic components, which makes it possible to take advantage of the key advantages of the OEOs in the optical and microwave ranges.

ных компонентов, что позволяет воспользоваться ключевыми преимуществами ОЭГ в оптическом и СВЧ-диапазонах.

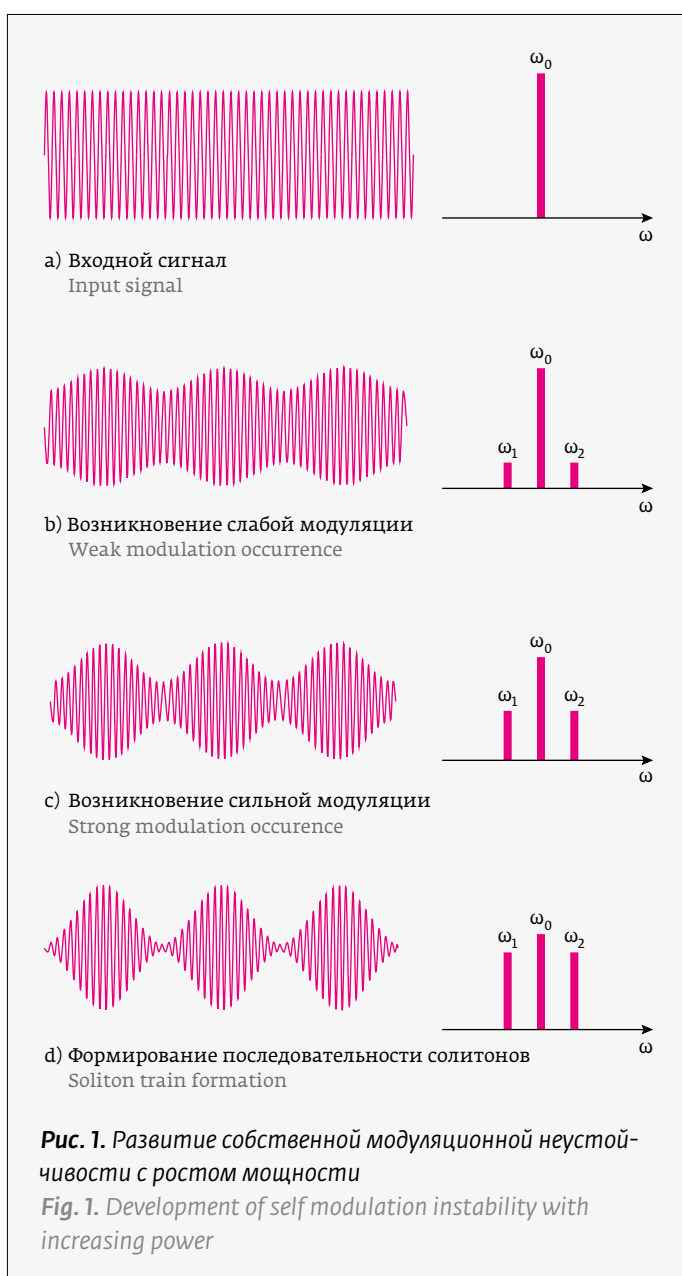
В статье рассматриваются основные типы оптоэлектронных СВЧ-генераторов. Статья не претендует на исчерпывающую полноту охвата работ по ОЭГ. На настоящий момент времени база данных «Web of Science» по запросу «Optoelectronic oscillator» выдает более полутора тысяч статей. В последнее десятилетие публикуется порядка 150 статей в год. Такое многообразие работ не позволяет сослаться на все публикации, внесшие вклад в развитие этого направления. Поэтому авторы ограничили себя классификацией оптоэлектронных СВЧ-генераторов по принципу действия со ссылками на основные работы и приносят свои извинения тем авторам, чьи работы не вошли в данный обзор.

## 1. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРОВ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Генерацию СВЧ-сигнала можно получить при помощи оптической накачки нелинейной среды и дальнейшей генерации оптической частотной гребенки. Это возможно при проявлении собственной модуляционной неустойчивости, которая может возникать только в нелинейных диспергирующих средах. Явление собственной модуляционной неустойчивости заключается в том, что при распространении интенсивного квазимонохроматического сигнала в нелинейной диспергирующей среде возникает периодическая самомодуляция его амплитуды. При этом в спектре сигнала вокруг основной гармоники рождаются боковые гармоники (их часто называют сателлитами). Такой эффект является пороговым и обусловлен развитием четырехволнового параметрического взаимодействия волн [1].

Развитие собственной модуляционной неустойчивости качественно поясняет рис. 1. Синусоидальный сигнал вводится в нелинейную диспергирующую среду. Кроме этого сигнала в среде всегда присутствует тепловой шум, вызванный тепловыми колебаниями среды. По мере увеличения вводимой в среду мощности вследствие четырехволнового параметрического процесса мощность боковых гармоник возрастает.

Оптические гребенки во временной области представляют собой последовательность нелинейных оптических импульсов – солитонов, которые являются результатом сложения множества резонансных гармоник системы. Главной особенно-



The article discusses the main types of optoelectronic microwave oscillators. The article does not claim to be an exhaustive coverage of the work on the OEO. At the present time, the Web of Science database produces more than one and a half thousand articles on the query “Optoelectronic oscillator”. In the last decade, about 150 articles have been published per year. Such a variety of works does not allow us to refer to all the publications that have contributed to the development of this direction. Therefore, the authors limited themselves to the classification of optoelectronic microwave oscillators according to the principle of operation with references to the main works and apologize to those authors whose works were not included in this review.

стью оптических частотных гребенок является эквидистантность оптических гармоник их спектра. Это позволяет использовать оптические гребенки для генерации СВЧ-сигналов.

Рис. 2 объясняет получение СВЧ-сигнала из оптической частотной гребенки. При фотодетектировании последовательности оптических импульсов получается последовательность электрических импульсов. Они характеризуются периодом повторения  $T_r$ , который напрямую определяет интервал между соседними частотами

## 1. OPTOELECTRONIC OSCILLATORS BASED ON RESONATORS WITH WHISPERING GALLERY MODES

Generation of a microwave signal can be obtained using optical pumping of a nonlinear medium and further generation of an optical frequency comb. This is possible when self-modulation instability manifests itself, which can arise only in nonlinear dispersive media. The phenomenon of self-modulation instability lies in the fact that when an intense quasi-monochromatic signal propagates in a nonlinear

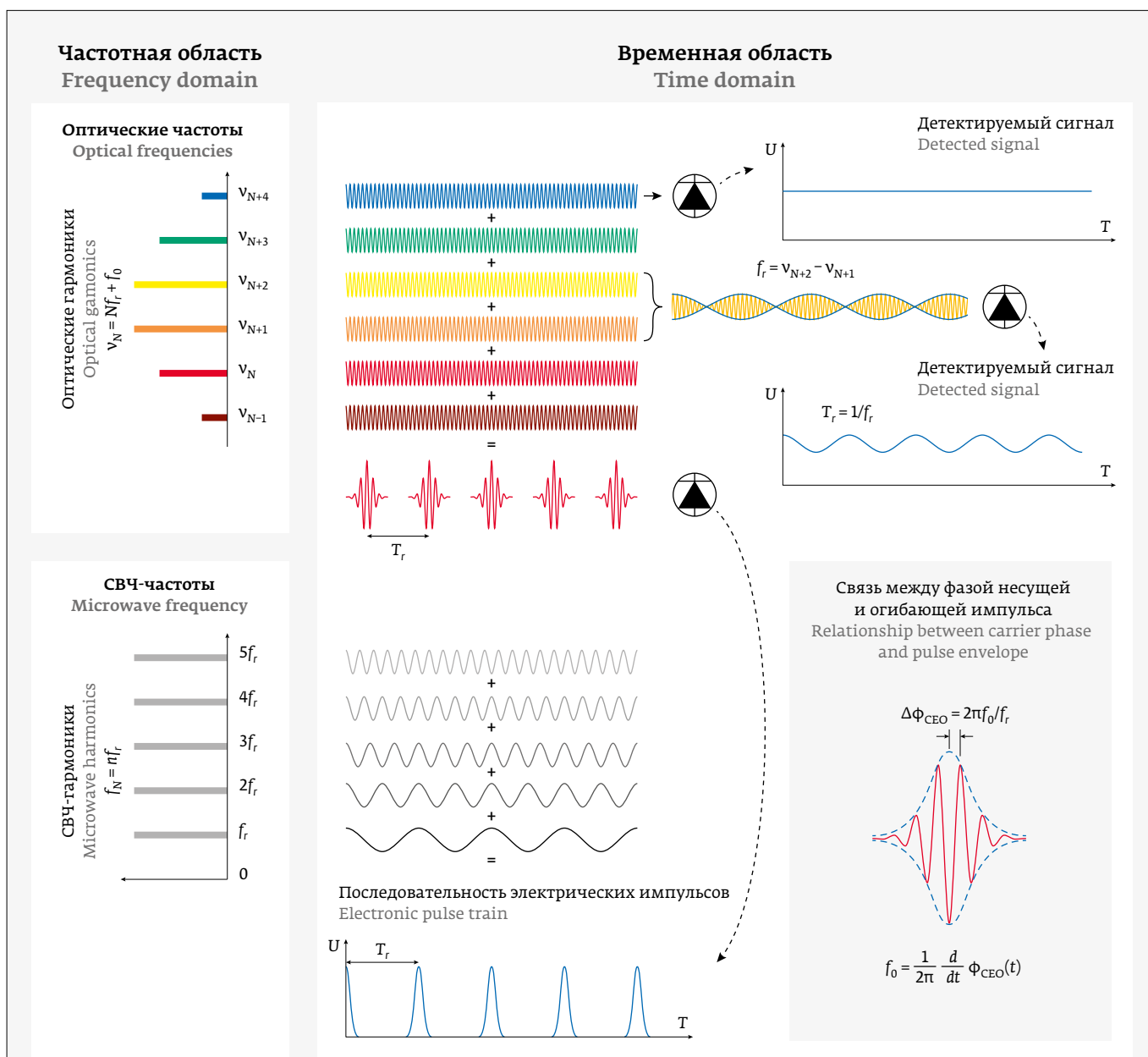


Рис. 2. Представление оптических гребенок во временной и частотной области и их связь с СВЧ-частотами [2]

Fig. 2. Representation of optical combs in the time and frequency domain and their relationship with microwave frequencies [2]

оптической гребенки как  $f_r=1/T_r$ . Спектр детектируемого сигнала представляет собой набор эквидистантных гармоник с периодом повторения  $f_r$ . Спектр частотной гребенки может быть сдвинут на частоту  $f_0$ , которая является мерой когерентности между гармониками гребенки и показывает изменение фазы оптической несущей относительно огибающей импульса. Таким образом, частота  $N$ -ой гармоники в гребенке определяется следующим выражением:

$$\nu_N = N \cdot f_r + f_0. \quad (1)$$

Нелинейные свойства оптических резонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ) исследуются в течение долгого времени [3–5]. Типичная схема экспериментальной установки для проведения таких исследований приведена на рис. 3. В работе [6] была показана параметрическая генерация оптической частотной гребенки в дисковом резонаторе с МШГ, сделанном из фторида кальция ( $\text{CaF}_2$ ). Генерация осуществлялась за счет развития в резонаторе собственной модуляционной неустойчивости – четырехволнового параметрического процесса, при котором мощность излучения накачки перекачивается в боковые гармоники. Увеличение мощности накачки приводило к каскадной генерации эквидистантных гармоник и образованию частотной гребенки. Интервал между гармониками гребенки составлял 25 ГГц. Таким образом, в работе [6] была продемонстрирована генерация СВЧ-сигнала на частоте 25 ГГц с помощью оптической частотной гребенки. Путем изменения несущей частоты излучения накачки изменялся интервал между гармониками в гребенке. Он составлял  $m \cdot 25$  ГГц (где  $m$  – целое число). Вследствие этого менялась частота генерации СВЧ-сигнала с шагом 25 ГГц.

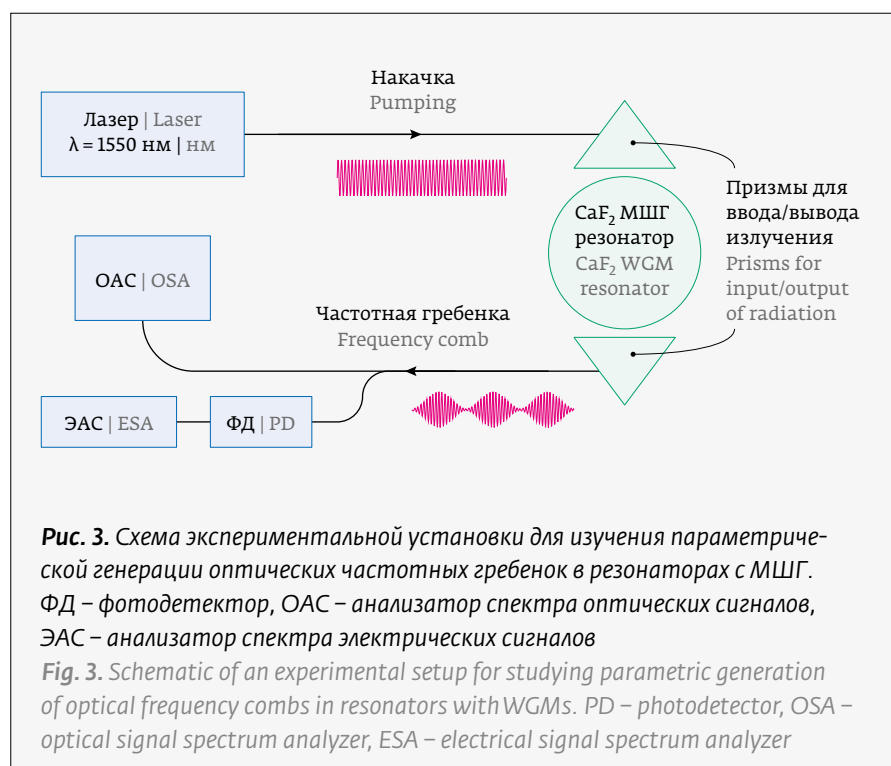
В работе [7] оптическая гребенка в дисковом резонаторе с МШГ диаметром 7,1 мм, сделанном из фторида магния ( $\text{MgF}_2$ ), была использована для генерации СВЧ-сигнала частотой 9,9 ГГц с уровнями фазового шума  $-60$  дБн/Гц и  $-120$  дБн/Гц при отстройках 10 Гц и 1 кГц соответственно. Уменьшение диаме-

дисpersive medium, periodic self-modulation of its amplitude occurs. In this case, side harmonics are generated in the signal spectrum around the fundamental harmonic (they are often called satellites). This effect is threshold and is due to the development of four-wave parametric interaction of waves [1].

The development of self-modulation instability is qualitatively explained in Fig. 1. A sinusoidal signal is introduced into a nonlinear dispersive medium. In addition to this signal, there is always thermal noise in the medium, caused by thermal vibrations of the medium. As the power introduced into the medium increases, due to the four-wave parametric process, the power of the side harmonics increases.

Optical combs in the time domain are a sequence of nonlinear optical pulses – solitons, which are the result of the addition of many resonant harmonics of the system. The main feature of optical frequency combs is the equidistance of the optical harmonics of their spectrum. This allows the use of optical combs to generate microwave signals.

Fig. 2 explains the acquisition of a microwave signal from an optical frequency comb. By photodetecting a sequence of optical pulses, a sequence of electrical pulses is obtained. They are characterized by a repetition period  $T_r$ , which directly determines the spacing between adjacent optical comb frequencies as  $f_r=1/T_r$ . The spectrum of the detected signal is a set of equidistant harmonics with a repetition period  $f_r$ . The fre-



тра резонатора до 2,5 мм (2 мм) обеспечило увеличение частотного интервала между гармониками в гребенке и повышение частоты генерации на выходе фотодетектора до 28 ГГц (35 ГГц) с уровнем фазового шума  $-120$  дБн/Гц при отстройке 10 кГц [8].

Начиная с 2007 года генерация оптических частотных гребенок была получена в резонаторах с МШГ, имеющих формы микротороида [6, 9, 10], микропузырьковую форму [11,12] и резонаторов других форм, сделанных из фторидных стекол ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ) [6, 9, 10, 13-15].

## 2. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Генерация частотных гребенок также возможна в интегральных кольцевых резонаторах (рис. 4), выполненных из кремния [16,17] или нитрида кремния [18-24]. Эффективность четырехволнового процесса зависит от мощности накачки, нелинейности системы, длины взаимодействия и степени фазового синхронизма конкретных гармоник. Выбор геометрии и материала микрорезонатора определяет его резонансные частоты, а следовательно, и частоты, которые будут генерироваться в ходе четырехволнового параметрического процесса.

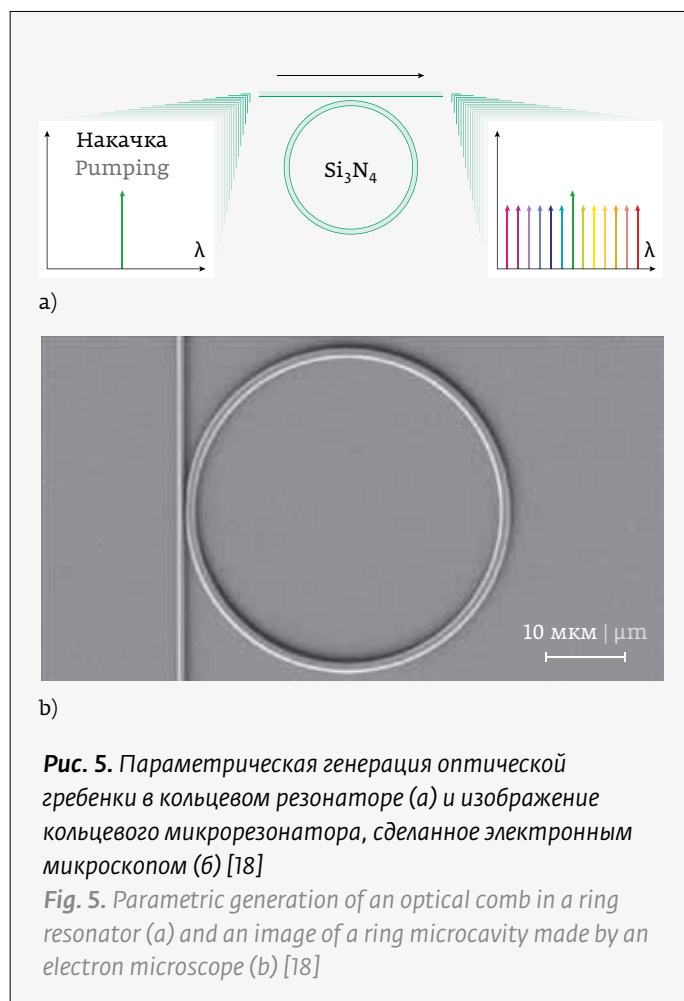
В работе [18] описываются частотные гребенки, формирующиеся в микрорезонаторах различного радиуса из нитрида кремния. На вход микрорезонатора подавалось непрерывное излучение накачки, а на его выходе наблюдалась частотная гребенка (рис. 5). Количество генерируемых гармоник и интервал между ними зависел от радиуса микрорезонатора. Так для кольца радиусом 58 мкм при накачке излучением 1557,8 нм наблюдалась генерация 87 гармоник (рис. 6а) в диапазоне от 1450 нм до 1750 нм с интервалом между соседними гармониками 403 ГГц. Для кольца радиусом 20 мкм при накачке излучением 1561 нм наблюдалась генерация 21 гармоник (рис. 6б) в диапазоне от 1450 нм до 1650 нм с интервалом между соседними гармониками 1,17 ТГц.

В других работах, посвященных генерации оптических частотных гребенок в интегральных кольцевых микрорезонаторах, удалось получить гребенки с интервалом между гармониками 204 ГГц [19] и 99 ГГц [23]. Для уменьшения интервала между

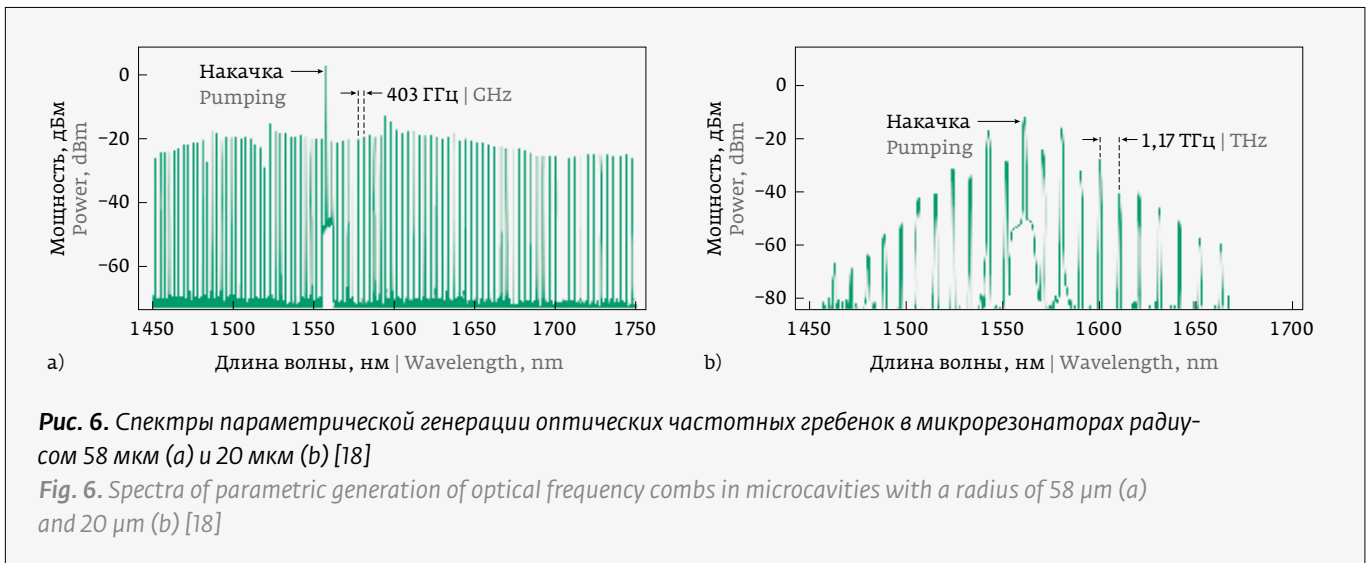


**Рис. 4.** Интегральные кольцевые резонаторы из нитрида кремния [24]  
**Fig. 4.** Integrated silicon nitride ring resonators [24]

frequency comb spectrum can be shifted by the frequency  $f_0$ , which is a measure of the coherence between the comb harmonics and shows the change in the phase of the optical carrier relative to the pulse envelope.



**Рис. 5.** Параметрическая генерация оптической гребенки в кольцевом резонаторе (а) и изображение кольцевого микрорезонатора, сделанное электронным микроскопом (б) [18]  
**Fig. 5.** Parametric generation of an optical comb in a ring resonator (a) and an image of a ring microcavity made by an electron microscope (b) [18]



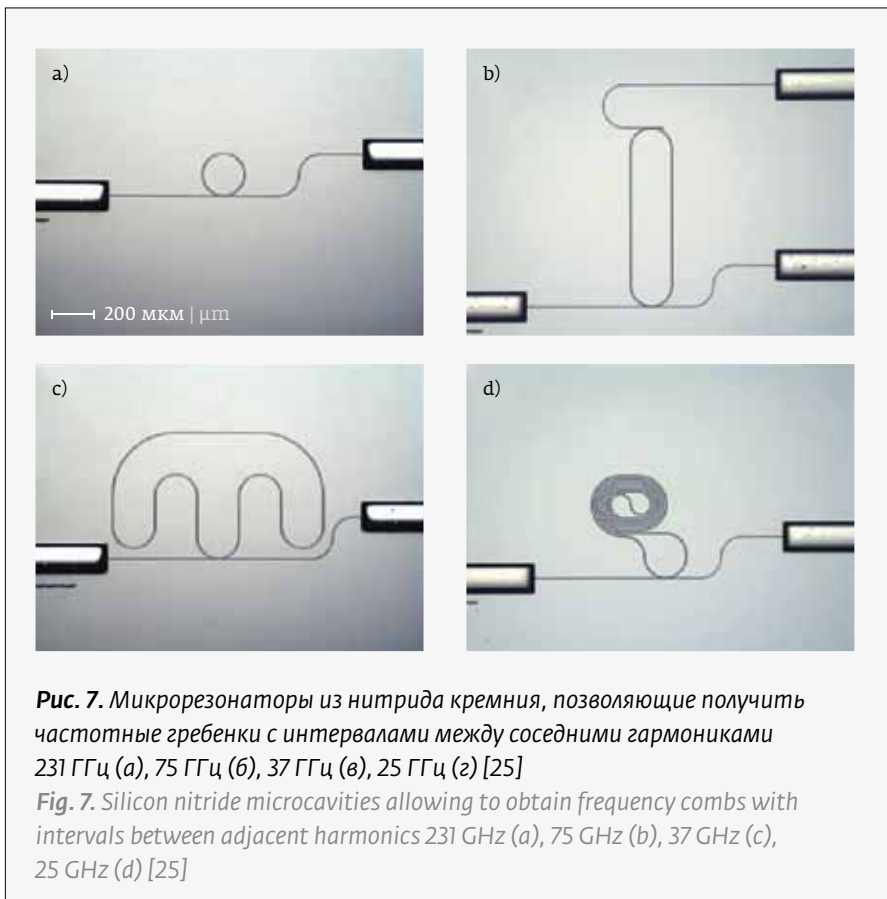
гармониками гребенки необходимо увеличивать время задержки оптического излучения в резонаторе, а следовательно, его радиус. Однако увеличение размера резонатора снижает целесообразность его использования. В работе [25] были предложены различные топологии интегральных микрорезонаторов, позволяющие получить сравнительно

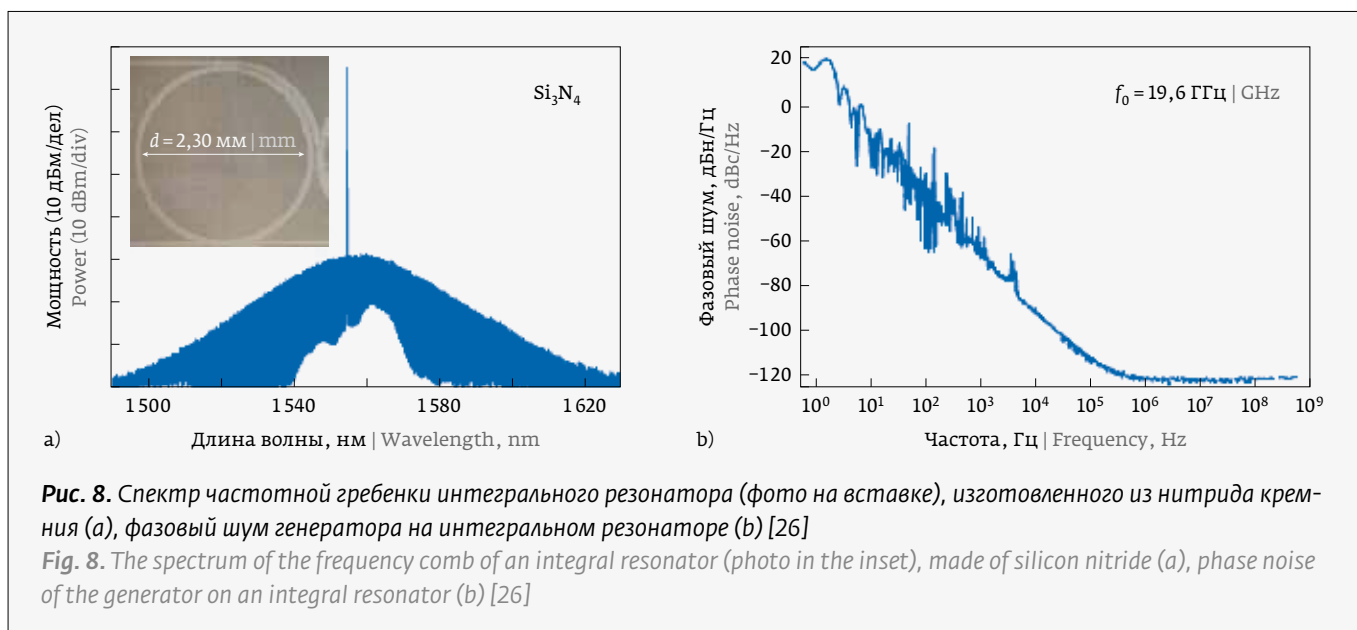
Thus, the frequency of the N-th harmonic in the comb is determined by the following expression:

$$\nu_N = N \cdot f_r + f_0 \quad (1)$$

The nonlinear properties of optical resonators with whispering gallery modes (WGMs) have been studied for a long time [3-5]. A typical diagram of an experimental setup for such studies is shown in Fig. 3.

In [6], parametric generation of an optical frequency comb in a disk resonator with a WGM made of calcium fluoride (CaF<sub>2</sub>) was shown. Generation was carried out due to the development of self-modulation instability in the cavity – a four-wave parametric process, in which the power from the pump radiation is pumped into side harmonics. An increase in the pump power led to the cascade generation of equidistant harmonics and the formation of a frequency comb. The interval between the comb harmonics was 25 GHz. Thus, in [6], the generation of a microwave signal at a frequency of 25 GHz using an optical frequency comb was demonstrated. By changing the carrier frequency of the pump radiation, the interval between the harmonics in the comb was changed. It was  $m \cdot 25$  GHz (where  $m$  is an integer). As a result, the





**Рис. 8.** Спектр частотной гребенки интегрального резонатора (фото на вставке), изготовленного из нитрида кремния (а), фазовый шум генератора на интегральном резонаторе (b) [26]

**Fig. 8.** The spectrum of the frequency comb of an integral resonator (photo in the inset), made of silicon nitride (a), phase noise of the generator on an integral resonator (b) [26]

небольшой интервал между соседними гармониками (25 ГГц) при сохранении миниатюрных размеров резонаторов.

В работе [26] исследован генератор на основе интегрального резонатора диаметром 2,3 мм, изготовленного из нитрида кремния. На рис. 8а показан его оптический спектр, который имеет вид гребенки вокруг интенсивной волны накачки. Добротность такого резонатора составляла  $2,2 \cdot 10^6$ . Резонатор переходил в режим генерации частотной гребенки при мощности оптического излучения 35 мВт. На рисунке 8b показан фазовый шум СВЧ-сигнала на частоте 19,6 ГГц.

### 3. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРАХ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Использование импульсных лазеров с синхронизацией мод позволяет получить сверхкороткие оптические импульсы с частотой повторения порядка  $f_r \approx 0,1\text{--}10$  ГГц. Спектр таких импульсов представляет собой частотную гребенку с интервалом между гармониками равной  $f_r$ . Так в работе [27] используется импульсный лазер с синхронизацией мод для генерации высокостабильных колебаний СВЧ-диапазона (рис. 9). Для генерации частотной гребенки используется титан-сапфировый лазер с синхронизацией мод, который генерировал оптические импульсы с частотой повторения 1 ГГц. При детектировании таких оптических импульсов на выходе фотодетектора образуется последовательность электрических импульсов, спектр которых представляет собой набор эквидистантных частот

frequency of generation of the microwave signal was changed with a step of 25 GHz.

In [7], an optical comb in a 7.1 mm WGM disk resonator made of magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ) was used to generate a 9.9 GHz microwave signal with phase noise levels of  $-60$  dBc/Hz and  $-120$  dBc/Hz at offsets of 10 Hz and 1 kHz, respectively. Reducing the resonator diameter to 2.5 mm (2 mm) provided an increase in the frequency interval between harmonics in the comb and an increase in the generation frequency at the photo-detector output to 28 GHz (35 GHz) with a phase noise level of  $-120$  dBc/Hz at 10 kHz offset [8].

Since 2007, the generation of optical frequency combs has been obtained in resonators with WGMs having the shape of a microtoroid [6, 9, 10], a microbubble shape [11, 12] and resonators of other shapes made of fluoride glasses ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ) [6, 9, 10, 13–15]

### 2. OPTOELECTRONIC OSCILLATORS BASED ON INTEGRAL RING RESONATORS

Generation of frequency combs is also possible in integral ring resonators (Fig. 4) made of silicon [16, 17] or silicon nitride [18–24]. The efficiency of a four-wave process depends on the pump power, system nonlinearity, interaction length, and phase matching of specific harmonics. The choice of the geometry and material of the microcavity determines its resonant frequencies and, consequently, the frequencies that will be generated during the four-wave parametric process.

The work [18] describes frequency combs formed in silicon nitride microcavities of different radii. Continuous pump radiation was applied to the input of the

с интервалом 1 ГГц. Затем при помощи полосно-пропускающего фильтра выделяется гармоника частотой 10 ГГц.

За счет фазовой синхронизации оптической гребенки с опорным излучением лазера высокая стабильность лазерного излучения переносится на оптические импульсы, а затем и на детектируемую последовательность электрических импульсов. В таком случае субгерцовая ширина спектральной линии опорного лазерного излучения переносится в микрогерцовую ширину спектральной линии СВЧ-сигнала. В работе [27] генерируемый сигнал обладал рекордно низким временным джитером 0,76 фс и кратковременной нестабильностью около  $8 \cdot 10^{-16}$  за 1 секунду. Фазовый шум составил -104 дБн/Гц и -157 дБн/Гц при отстройках

microcavity, and a frequency comb was observed at its output (Fig. 5). The number of generated harmonics and the interval between them depended on the radius of the microcavity. So for a ring with a radius of 58  $\mu\text{m}$ , when pumped with 1557.8 nm radiation, the generation of 87 harmonics was observed (Figure 6 (a)) in the range from 1450 nm to 1750 nm, with an interval between adjacent harmonics of 403 GHz. For a ring with a radius of 20  $\mu\text{m}$  when pumped with 1561 nm radiation, the generation of 21 harmonics was observed (Fig. 6 b) in the range from 1450 nm to 1650 nm, with an interval between adjacent harmonics of 1.17 THz.

In other works devoted to the generation of optical frequency combs in integrated ring microcavities, it was possible to obtain combs with a harmonic inter-

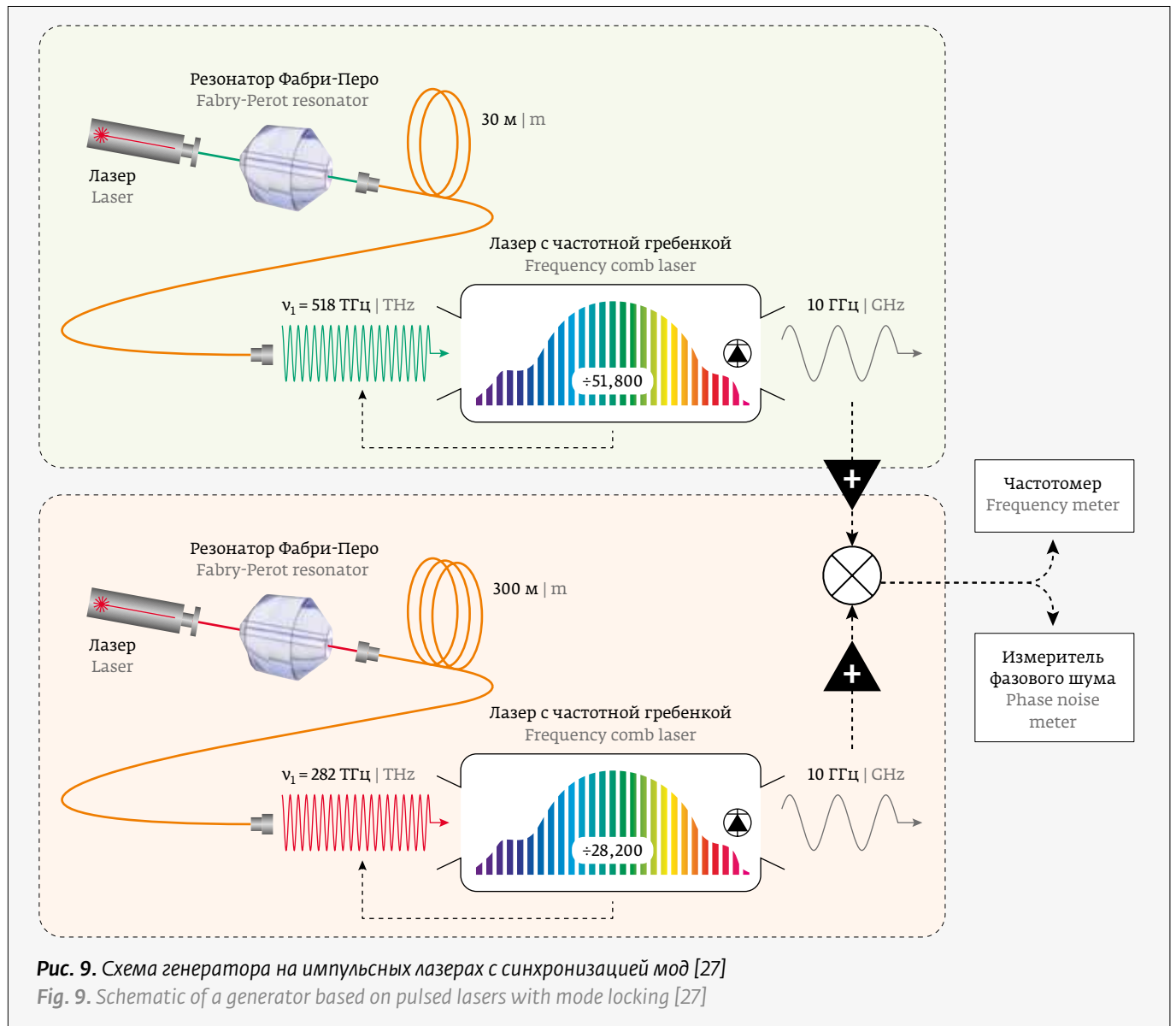


Рис. 9. Схема генератора на импульсных лазерах с синхронизацией мод [27]  
 Fig. 9. Schematic of a generator based on pulsed lasers with mode locking [27]





1 Гц и 1 МГц соответственно. Для измерения характеристик таких генераторов была сконструирована схема, показанная на рис. 9. Недостатком описанного генератора является его относительно большие размеры и возможность использования только в лабораторных условиях.

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

В следующей части обзора будут рассмотрены оптоэлектронные СВЧ-генераторы, созданные на основе активных кольцевых резонансных систем, а также проведено сопоставление фазовых шумов оптоэлектронных генераторов различных типов.

## REFERENCES

1. **Zakharov V. E., Ostrovsky L. A.** Modulation instability: the beginning. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2009; 238(5): 540–548.
2. **Fortier T., Baumann E.** 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications. *Communications Physics*. 2019; 2: Article No. 153.
3. **Braginsky V. B., Gorodetsky M. L., Ilchenko V. S.** Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes. *Physics Letters A*. 1989; 137(7–8): 393–397.
4. **Ilchenko V. S. et al.** Nonlinear optics and crystalline whispering gallery mode cavities. *Physical review letters*. 2004; 92(4): 043903.
5. **Pasquazi A. et al.** Micro-combs: A novel generation of optical sources. *Physics Reports*. 2018; 729: 1–81.
6. **Savchenkov A. A. et al.** Tunable optical frequency comb with a crystalline whispering gallery mode resonator. *Physical review letters*. 2008; 101(9): 093902.
7. **Liang W. et al.** High spectral purity Kerr frequency comb radio frequency photonic oscillator. *Nature communications*. 2015; 6: Article No. 7957.
8. **Seidel D. et al.** Minituarized K a-band Photonic Oscillators. 2018 *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*. IEEE. 2018; 1–2.
9. **Herr T. et al.** Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators. *Nature photonics*. 2012; 6(7): 480–487.
10. **Grudinin I. S., Baumgartel L., Yu N.** Frequency comb from a microresonator with engineered spectrum. *Optics express*. 2012; 20(6): 6604–6609.
11. **Yang Y. et al.** Four-wave mixing parametric oscillation and frequency comb generation at visible wavelengths in a silica microbubble resonator. *Optics letters*. 2016; 41(22): 5266–5269.
12. **Li M. et al.** Kerr parametric oscillations and frequency comb generation from dispersion compensated silica micro-bubble resonators. *Optics express*. 2013; 21(14): 16908–16913.
13. **Wang C. Y. et al.** Mid-infrared optical frequency combs at 2.5  $\mu\text{m}$  based on crystalline microresonators. *Nature communications*. 2013; 4: Article No. 1345.
14. **Grudinin I. S., Yu N., Maleki L.** Generation of optical frequency combs with a  $\text{CaF}_2$  resonator. *Optics letters*. 2009; 34(7): 878–880.
15. **Lucas E. et al.** Soliton-based optical kerr frequency comb for low-noise microwave generation. 2017 *Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF / IFCS)*. IEEE. 2017; 530–533.
16. **Griffith A. G. et al.** Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation. *Nature communications*. 2015; 6: Article No. 6299.
17. **Yu M. et al.** Mode-locked mid-infrared frequency combs in a silicon microresonator. *Optica*. 2016; 3(8): 854–860.
18. **Levy J. S. et al.** CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects. *Nature photonics*. 2010; 4(1): 37–40.
19. **Kippenberg T. J., Holzwarth R., Diddams S. A.** Microresonator-based optical frequency combs. *Science*. 2011; 332(6029): 555–559.
20. **Okawachi Y. et al.** Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip. *Optics letters*. 2011; 36(17): 3398–3400.
21. **Herr T. et al.** Universal formation dynamics and noise of Kerr-frequency combs in microresonators. *Nature photonics*. 2012; 6(7): 480–487.
22. **Okawachi Y. et al.** Bandwidth shaping of microresonator-based frequency

val of 204 GHz [19] and 99 GHz [23]. To decrease the interval between the comb harmonics, it is necessary to increase the delay time of the optical radiation in the cavity, and, consequently, its radius. However, an increase in the size of the resonator reduces the feasibility of its use. In [25], various topologies of integrated microcavities were proposed, which make it possible to obtain a relatively small interval between adjacent harmonics (25 GHz) while maintaining the miniature dimensions of the resonators.

In [26], a generator based on an integral resonator with a diameter of 2.3 mm, made of silicon nitride, was investigated. Figure 8 (a) shows its optical spectrum, which looks like a comb around the intense pump wave. The Q factor of such a resonator was  $2.2 \cdot 10^6$ . The resonator switched to the frequency comb generation mode at an optical radiation power of 35 mW. Fig. 8 (b) shows the phase noise of a microwave signal at a frequency of 19.6 GHz.

## 3. OPTOELECTRONIC OSCILLATOR BASED ON PULSED LASERS WITH MODE SYNCHRONIZATION

The use of mode-locked pulsed lasers makes it possible to obtain ultrashort optical pulses with a repetition rate of the order of  $f_r \approx 0.1\text{--}10$  GHz. The spectrum of such pulses is a frequency comb with an interval between harmonics equal to  $f_r$ . So in work [27], a pulsed laser with mode locking is used to generate highly stable oscillations in the microwave range (Fig. 9). A mode-locked titanium-sapphire laser is used to generate a frequency comb, which generates optical pulses with a repetition rate of 1 GHz. When detecting such optical pulses, a sequence of electrical pulses is formed at the output of the photodetector, the spectrum of which is a set of equidistant frequencies with an interval of 1 GHz. Then, using a band pass filter, the 10 GHz harmonic is isolated.

Due to the phase locking of the optical comb with the reference laser radiation, the high stability of the laser radiation is transferred to the optical pulses, and then to the detected sequence of electrical pulses. In such a case, the subhertz line width of the reference laser light is transferred to the microhertz line width of the microwave signal. In [27], the generated signal had a record low temporal jitter of 0.76 fs and a short-term instability of about  $8 \cdot 10^{-16}$  per second. The phase noise was  $-104$  dBc/Hz and  $-157$  dBc/Hz, at 1 Hz and 1 MHz offsets, respectively. To measure the characteristics of such generators, the circuit shown in Fig. 9 was designed. The disadvantage of the described generator is its relatively large size and the possibility of using it only in laboratory conditions.

- combs via dispersion engineering. *Optics letters*. 2014; 39(12): 3535–3538.
23. Liu J. et al. Ultralow-power chip-based soliton microcombs for photonic integration. *Optica*. 2018; 5 (10): 1347–1353.
  24. Raja A. S. et al. Electrically pumped photonic integrated soliton microcomb. *Nature communications*. 2019; 10: Article No. 680.
  25. Liu Y. et al. Investigation of mode coupling in normal-dispersion silicon nitride microresonators for Kerr frequency comb generation. *Optica*. 2014; 1(3): 137–144.
  26. Liu J. et al. Photonic Integrated Microwave Oscillator Based on Silicon Nitride Soliton Microcomb. *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. IEEE. 2019.
  27. Fortier T. M. et al. Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division. *Nature Photonics*. 2011; 5(7): 425–429.

## 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

Тазенко 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. Стальмаха», 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.

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).

*Optoelectronic microwave oscillators based on active ring resonant systems and a comparison of the phase noise of different types of optoelectronic generators will be considered in the next part of the review.*

## 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.

### Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



### Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 340-4200 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 15 ТВт

