



# Генерация оптических частотных гармоник для систем квантовых коммуникаций на боковых частотах

В. М. Петров<sup>1</sup>, А. В. Шамрай<sup>2</sup>, И. В. Ильичев<sup>2</sup>,  
Н. Д. Герасименко<sup>1</sup>, В. С. Герасименко<sup>1</sup>, П. М. Агрозов<sup>2</sup>,  
В. В. Лебедев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Впервые продемонстрировано существенное влияние пассивной (т. е. без дополнительного усиления) оптической обратной связи на количество спектральных компонент выходного сигнала фазового СВЧ интегрально-оптического модулятора. Выявлены условия, при которых количество дополнительных спектральных компонент увеличивается вплоть до  $2 \times 20$  шт, а перекрываемый ими спектральный диапазон достигает 69 ГГц.

Предложено использовать данный эффект для увеличения скорости передачи квантового ключа, а также для расширения функциональных возможностей оптических систем связи, использующих спектральное уплотнение (DWDM).

**Ключевые слова:** квантовые коммуникации, интегрально-оптические модуляторы, эксплуатационные характеристики модуляторов, оптическая обратная связь.

Статья получена: 06.11.2020

Принята к публикации: 19.11.2020

## ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье [1] мы описали СВЧ интегрально-оптические модуляторы, которые были разработаны нами для систем квантовых коммуникаций, использующих технологию пере-

# Generation of Optical Frequency Harmonics for Quantum Communication Systems at Side Frequencies

V. M. Petrov<sup>1</sup>, A. V. Shamray<sup>2</sup>, I. V. Ilyichev<sup>2</sup>, N. D. Gerasimenko<sup>1</sup>,  
V. S. Gerasimenko<sup>1</sup>, P. M. Agruzov<sup>2</sup>, V. V. Lebedev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> A.F. Ioffe PTI of RAS, St. Petersburg, Russia

For the first time, a significant effect of passive (i. e., without additional amplification) optical feedback on the number of spectral components of the output signal of a phase microwave integrated optical modulator has been demonstrated. The conditions are revealed under which the number of additional spectral components increases to  $2 \times 20$  pieces, and the spectral range covered by them reaches up to 69 GHz.

It is proposed to use this effect to increase the transmission rate of the quantum key, as well as to expand the functionality of optical communication systems using based on DWDM standards.

**Keywords:** quantum communications, microwave integrated optical modulators, performance characteristics of modulators, optical feedback

Received on: 06.11.2020

Accepted on: 19.11.2020

## INTRODUCTION

In a previous article [1], we described microwave integrated optical modulators that we developed for quantum communication systems [2]. We have developed both types of high-quality modulators: phase (FM) and amplitude (AM). According to the algorithm, a pair of side frequencies that occur during phase modulation at frequency  $F$  of the optical carrier at frequency  $f$  is usually used to transmit a quantum key. The FM modulator is used for this purpose. The AM modulator provides input of the transmitted information, i. e. the code itself. One of the main tasks from the point of view of applications is to increase the transmission speed of the quantum

дачи квантового ключа на боковых частотах [2]. Нами разработаны оба типа модуляторов: фазовый (ФМ) и амплитудный (АМ) высокого качества. Согласно алгоритму работы для передачи квантового ключа, как правило, используются пара боковых частот  $f \pm F$ , возникающих при фазовой модуляции на частоте  $F$  оптической несущей на частоте  $f$ . Для этого используется ФМ-модулятор. АМ-модулятор обеспечивает ввод передаваемой информации, т. е. самого кода.

Одной из главных задач с точки зрения практических применений является повышение скорости передачи квантового ключа. Очевидно, что повысить скорость передачи квантового ключа можно, увеличив количество генерируемых пар боковых частот  $f \pm N \times F$ ,  $N = 1, 2, 3 \dots$

В данной работе мы продемонстрируем простую и эффективную методику увеличения пар боковых частот без использования дополнительного оптического усилителя.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НАБОРА ПАР БОКОВЫХ ЧАСТОТ

Идея использования обратной связи (как электрической, так и оптической) в комбинации с СВЧ оптическим модулятором была предложена ещё в 90-е годы прошлого века [3-6]. Излучение от лазерного источника вводилось в кольцевой волноводный резонатор, в котором многократно проходило через модулятор и усилитель, после чего часть излучения попадала на оптический анализатор спектра и фотодиод [3].

Как видно на рис. 1а, в качестве элемента ввода-вывода в резонатор предлагалось использовать X-светоделитель (делитель 2 на 2). Нижние вход и выход светоделиителя используются для создания петли обратной связи, верхний выход использовался для вывода излучения. После вывода излучения из волноводной петли оно должно подаваться на еще один делитель, откуда направляется на анализатор спектра и на фотодиод. Сигнал с последнего подается в электронный блок управления модулятором, где используется для подстройки петли не только для СВЧ, но и для оптического резонанса. Задача волоконного усилителя – скомпенсировать потери в петле, включая отвод части энергии на делителе. На рис. 1б показаны частотные гребенки, полученные в результате расчетов, для различных коэффициентов усиления петли резонатора.

Дальнейшие опыты с использованием аналогичной схемы (рис. 2а) позволили покрыть более

key. Obviously, it is possible to increase the transmission speed of the quantum key by increasing the number of generated side frequency pairs,  $N=1, 2, 3 \dots$

In this paper, we will demonstrate a simple and effective method for increasing side frequency pairs without using an additional optical amplifier.

### FEEDBACK USE TO EXPAND FUNCTIONAL CAPABILITIES

The idea of using feedback (both electrical and optical) in combination with a microwave optical modulator was proposed back in the 90s of the last century [3-6]. Radia-

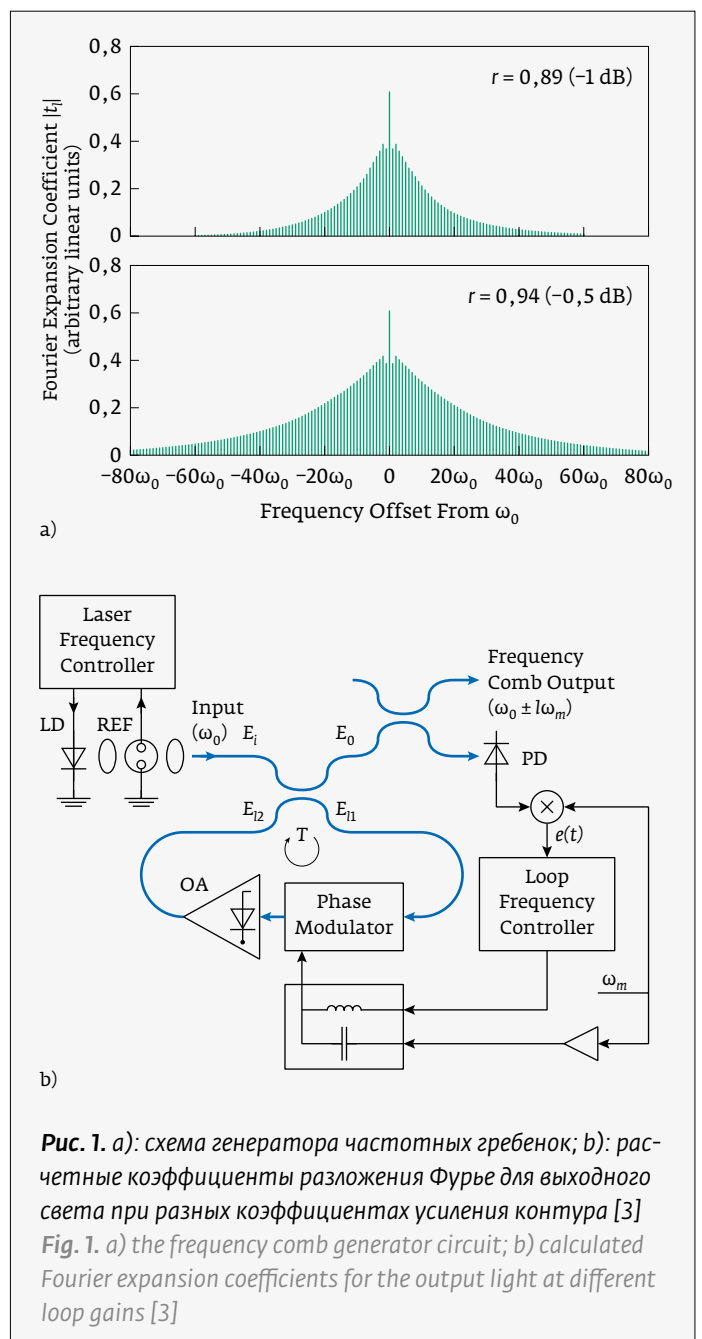


Рис. 1. а): схема генератора частотных гребенок; б): расчетные коэффициенты разложения Фурье для выходного света при разных коэффициентах усиления контура [3]  
Fig. 1. a) the frequency comb generator circuit; b) calculated Fourier expansion coefficients for the output light at different loop gains [3]

широкий спектральный интервал частотной гребенкой более равномерной интенсивности (рис. 2b) [4].

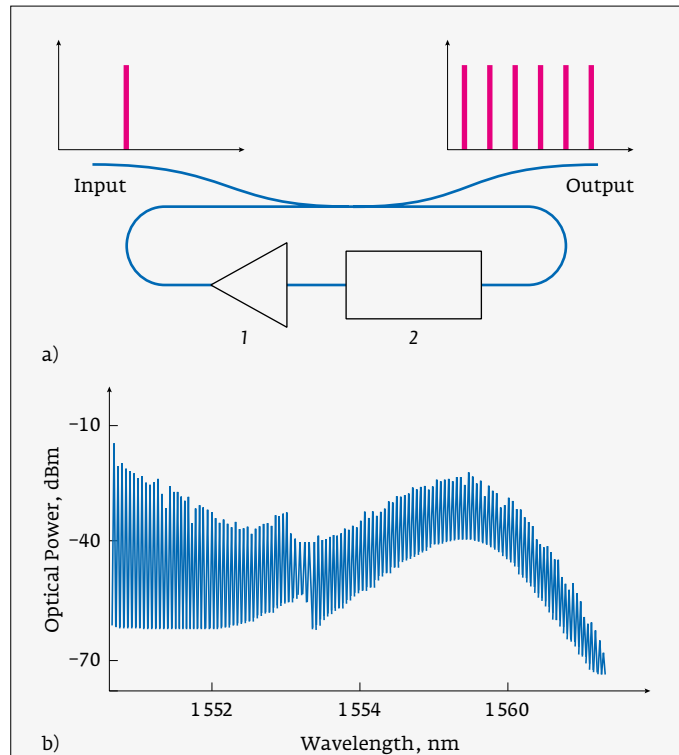
Другим интересным способом создания обратной связи было превращение модулятора в резонатор Фабри-Перо путём помещения его между брэгговских зеркал, отражающих часть боковых спектральных линий с одной из сторон от оптической несущей [5–7]. В некоторых таких схемах также использовались усилители внутри резонатора, позволившие добиться появления нескольких дополнительных спектральных пиков с использованием однопортового фазового модулятора [5].

На рис. 3а показана схема эксперимента с брэгговскими зеркалами. Фазовый модулятор помещен между брэгговскими зеркалами, в результате чего и возникает обратная связь и происходит генерация боковых частот (рис. 3b).

Важно обратить внимание, что использование усилителей внутри резонатора приводит к тому, что оптический шум на собственных частотах начинает усиливаться и вредит качеству линий гребенки [3]. Именно поэтому интереснее было бы обратить внимание на исследования схем без уси-

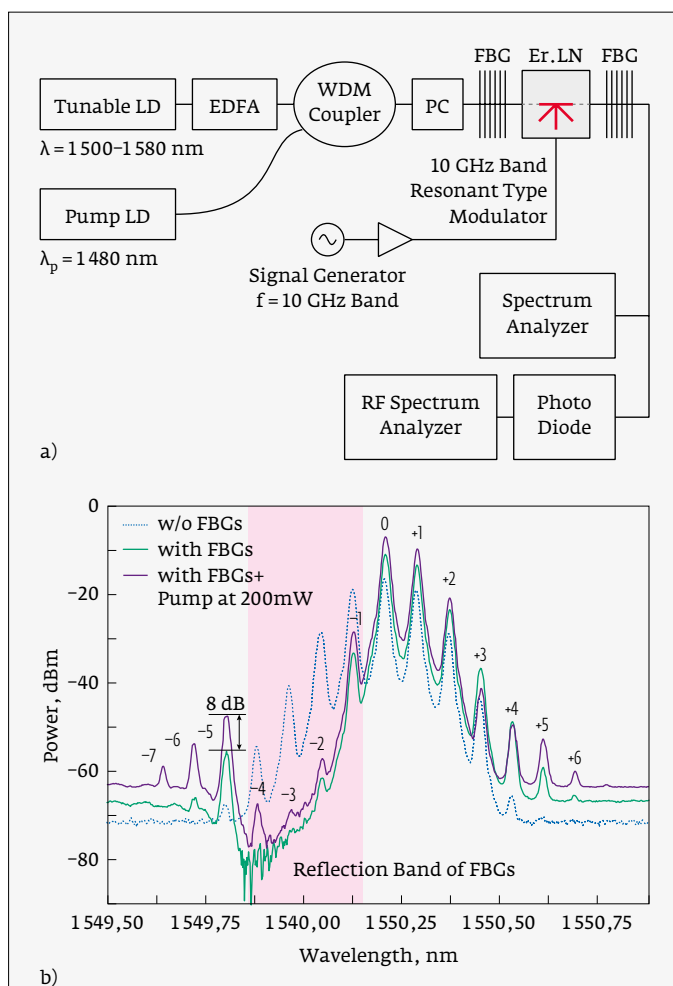
tion from a laser source was introduced into a ring waveguide resonator, in which it repeatedly passed through a modulator and an amplifier, after which a part of the radiation fell on an optical spectrum analyzer and a photodiode [3].

As seen in Fig. 1a, it was proposed to use an X-beam splitter (divider 2 by 2) as an input-output element in the resonator. The lower input and output of the beam splitter are used to create a feedback loop, the upper output is used to output radiation. After radiation is removed from the waveguide loop, it must be fed to another divider, from where it is directed to the spectrum analyzer and to the photodiode. The signal from the latter is fed to the electronic control unit of the modulator, where it is used to adjust the loop not only for microwave, but also for optical resonance. The task of the fiber amplifier is to compensate for losses in the loop, including the removal of some of the energy at the divider. Fig. 1b shows the



**Рис. 2.** а) схема эксперимента, 1 – оптический усилитель, 2 – СВЧ-модулятор; б) выходной спектр [4]

**Fig. 2.** а): experimental design. 1 – optical amplifier, 2 – RF-modulator; б) output spectrum [4]



**Рис. 3.** а) схема эксперимента; б) выходной спектр [5]

**Fig. 3.** Method for creating feedback using Bragg mirrors: а) experimental scheme; б) output spectrum [5]

ления [6, 7]. В них также используются брэгговские зеркала, в связи с чем получавшиеся частотные гребенки приобретали спектральный провал шириной в несколько пиков [6].

На рис. 4а показана схема эксперимента без использования усилителя. Здесь электрический СВЧ-сигнал подается на два электрических входа фазового модулятора через циркулятор и делитель мощности. Сам модулятор помещен между брэгговскими зеркалами. В результате происходит модуляция прямой и обратной оптических волн электрическими сигналами (двунаправленная накачка). На рис. 4б показан выходной спектр при двунаправленной накачке, в котором наблюдается провал, обусловленный полосой отражения зеркала.

Для компенсации этого провала в некоторых экспериментах в оптический канал добавлялся

calculated frequency combs for different resonator loop gains.

Further experiments using a similar scheme (Fig. 2a) made it possible to cover a wider spectral interval with a frequency comb of more uniform intensity (Fig. 2b) [4].

Another interesting way of creating feedback was converting the modulator into a Fabry-Perot cavity by placing it between Bragg mirrors that reflect part of the side spectral lines on one side of the optical carrier [5-7]. Some of these schemes also used in-resonator amplifiers, which allowed for the appearance of several additional spectral peaks using a single-port phase modulator [5].

The scheme of the experiment with Bragg mirrors is shown in Fig. 3a. The phase modulator is placed between the Bragg mirrors, as a result of which feedback occurs and side frequencies are generated (Fig. 3b).

It is important to note that the use of amplifiers inside the cavity leads to the fact that the optical noise at natural frequencies begins to amplify and harms the quality of the comb lines [3]. That is why it would be more interesting to consider the results of operation of circuits without amplification [6, 7]. They also use Bragg mirrors. In this regard, the resulting frequency combs acquired a spectral dip with a width of several peaks [6].

The diagram of the experiment without using an amplifier is shown in Fig. 4a. Here, an electrical microwave signal is fed to two electrical inputs of the phase modulator through a circulator and a power divider. The modulator itself is placed between the Bragg mirrors. As a result, the forward and backward optical waves are modulated by electrical signals (bidirectional pumping). Fig. 4b shows the output spectrum with bidirectional pumping with a dip due to the reflection band of the mirrors. To compensate for this dip, in some experiments, a fiber-optic erbium amplifier was added to the optical channel, which was already located outside the cavity [7].

Fig. 5a shows a diagram of an experiment with an amplifier. The phase modulator is placed between the Bragg filters, and the amplifiers are located in front of the feedback lines (in front of the polarization controller) and behind it (immediately after the second filter). Fig. 5b shows the output spectrum: the dashed line indicates the unmodulated signal, the solid line indicates the modulated signal.

It can also be noted that these studies used two-port phase modulators that effectively interact with light regardless of the direction of the beam path.

All the schemes discussed above were used to obtain optical frequency combs. However, this problem was and is being solved now in other ways, we will also consider them. One of the solutions is the use of an

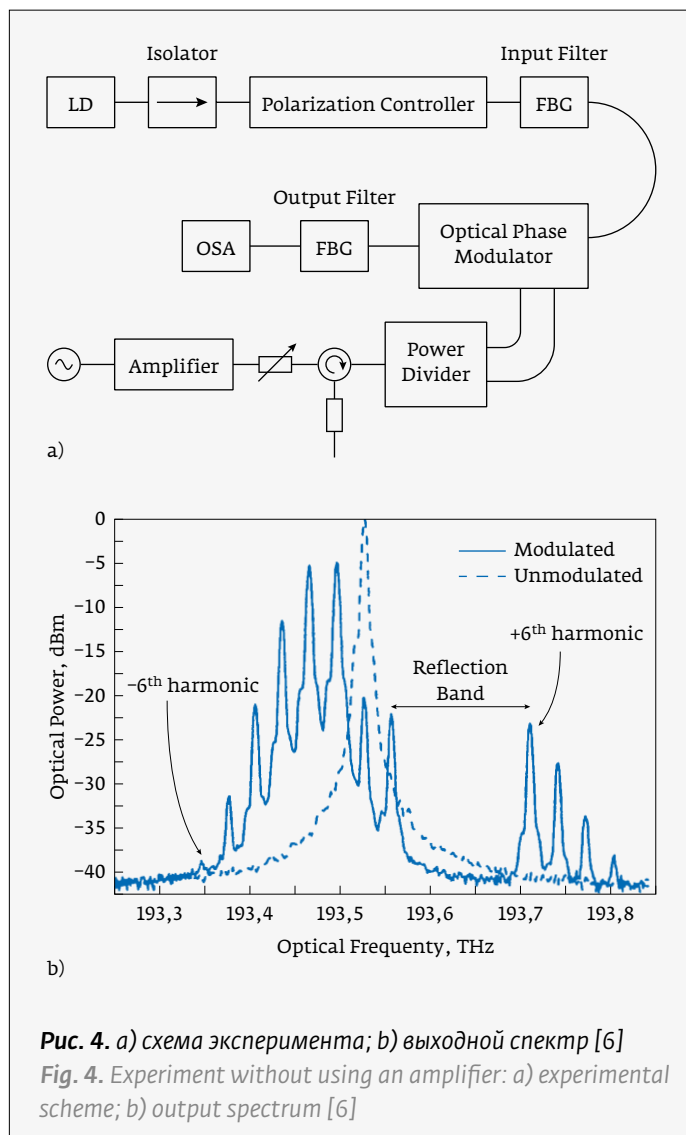


Рис. 4. а) схема эксперимента; б) выходной спектр [6]  
 Fig. 4. Experiment without using an amplifier: а) experimental scheme; б) output spectrum [6]

волоконно-оптический эрбиевый усилитель уже вне резонатора [7].

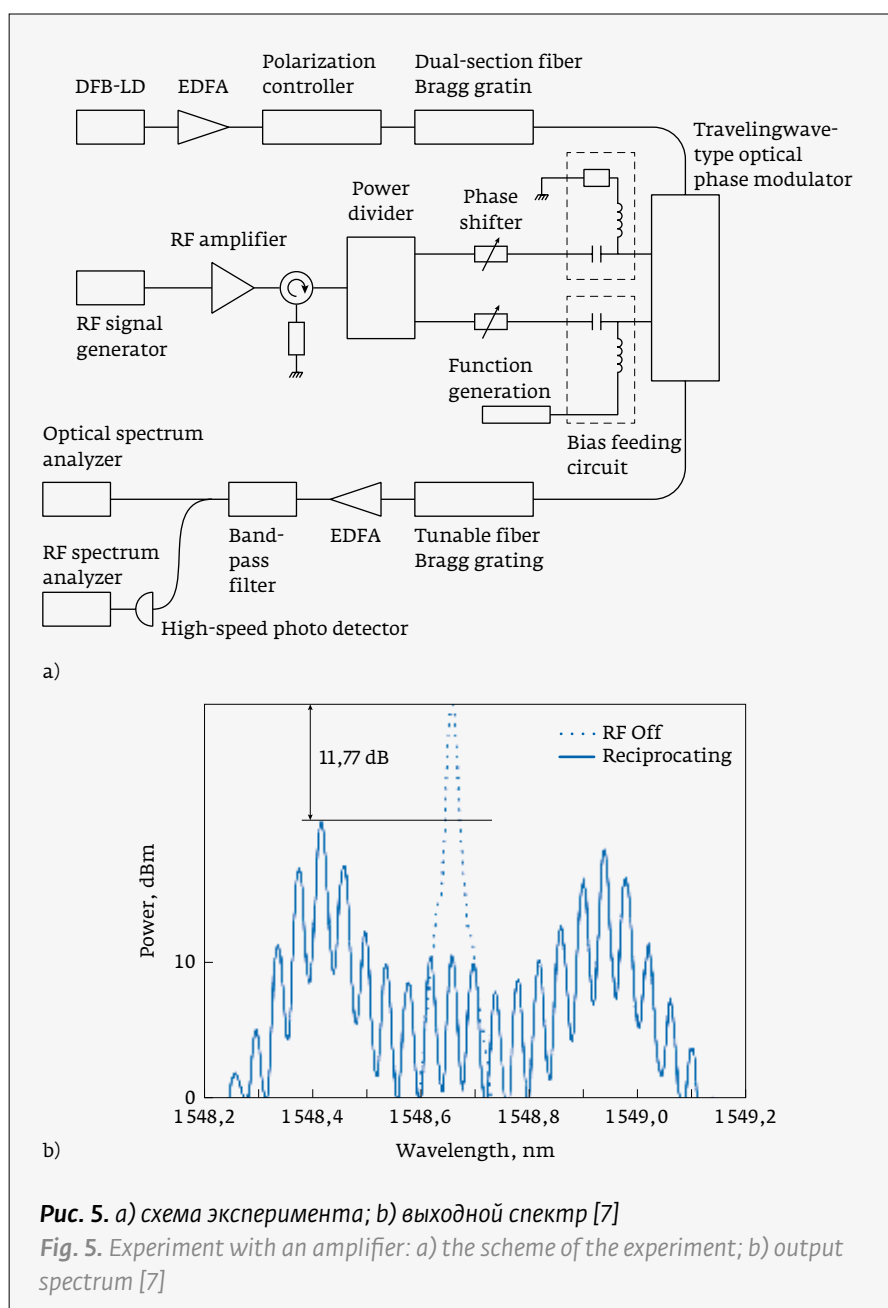
На рис. 5а показана схема эксперимента с усилителем. Фазовый модулятор помещен между брэгговскими фильтрами, а усилители располагаются перед линией обратной связи (перед контроллером поляризации) и за ней (непосредственно после второго фильтра). На рис. 5б показан выходной спектр: пунктиром обозначен немодулированный сигнал, сплошной линией – промодулированный.

Также можно отметить, что в этих исследованиях использовались двухпортовые фазовые модуляторы, эффективно взаимодействующие со светом независимо от направления хода лучей.

Все рассмотренные выше схемы применялись для получения оптических частотных гребенок. Однако эту задачу решали и решают сейчас и другими способами, обратим внимание и на них. Одним из решений является использование электрооптического осциллятора [8]: системы, состоящей из электрооптического модулятора, светоделителя, отводящего часть излучения через светофильтр на фотодиод, электронной системы усиления и фильтрации и СВЧ-делителя, возвращающего часть обработанного сигнала с фотодиода на электронный вход модулятора [9]. Даже в исходной идее с выделением на фотодетекторе одной частоты после радиочастотного усилителя на модуляторе естественным образом могут возникать гармоники высших порядков. Когда же в электронную обратную связь возвращается несколько боковых частот, система производит модуляцию на каждой из них, что значительно увеличивает число спектральных пиков.

Другой способ получения частотных гребенок основан на возможности при определенном подборе управляющего напряжения использовать модулятор Маха-Цендера для

electro-optical oscillator [8]: a system consisting of an electro-optical modulator, a beam splitter that removes part of the radiation through a light filter to a photodiode, an electronic amplification and filtering system, and a microwave divider that returns a part of the processed signal from the photodiode to the electronic input of the modulator [9]. Even in the original idea with the selection of one frequency on the photodetector after the RF amplifier on the modulator, higher-order harmonics can naturally arise. When several side frequencies return to the electronic feedback, the system modulates each of them. This significantly increases the number of spectral peaks.



**Рис. 5.** а) схема эксперимента; б) выходной спектр [7]

**Fig. 5.** Experiment with an amplifier: a) the scheme of the experiment; b) output spectrum [7]

выравнивания интенсивности его выходного спектра [10] (идея основана на возможности подстройкой длины плеч интерферометра Маха-Цендера уменьшать по необходимости интенсивность четных либо нечетных гармоник). Однако только выравнивания спектра не достаточно – необходимо еще получить достаточно большое количество пиков гребенки.

Для решения этой задачи использовались каскады модуляторов [11–14]. В простейшем варианте свет проходил сначала амплитудный модулятор, а потом фазовый [11]. В более сложных опытах, демонстрировавших более ровные и широкие гребенки, каскад из двух модуляторов дополнялся еще одним: амплитудным на входе каскада [12] или фазовым на выходе [13]. Первый из этих каскадов демонстрировал большую ширину гребенки, но меньшую интенсивность каждого пика. В связи с этим дальнейшее увеличение числа модуляторов исследовалось только для фазовых устройств: в опытах с каскадом из трех фазовых модуляторов с одним амплитудным на выходе было получено более 70 спектральных линий в пределах -10 дБ относительно входной мощности [14] (рис. 6).

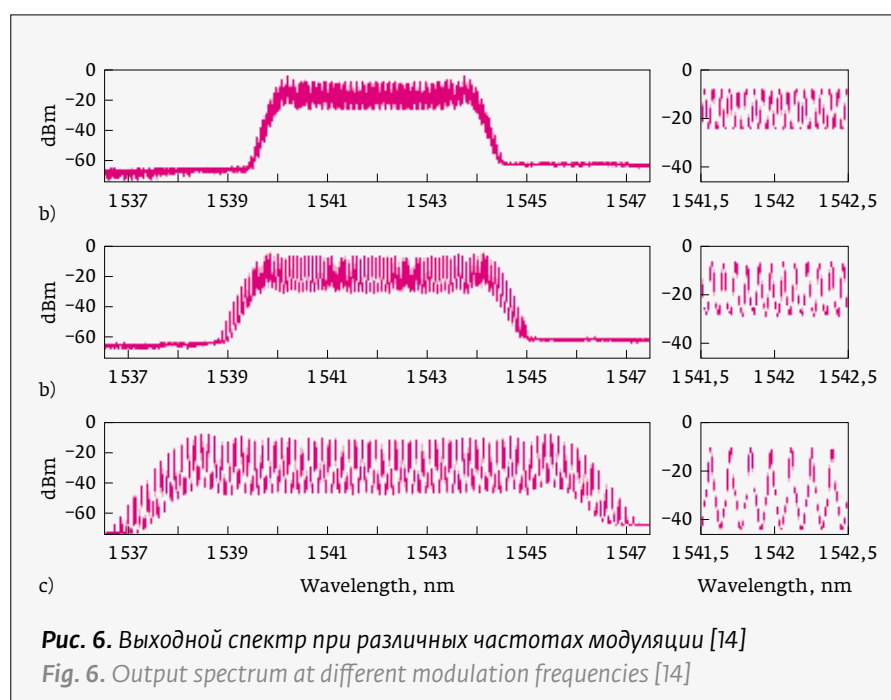
На рис. 6 приведен выходной спектр при использовании каскада модуляторов, состоящего из трех фазовых и одного амплитудного: сверху вниз – 73, 65 и 63 линии соответственно.

Также интересным направлением исследований являются пленочные модуляторы на ниобате лития [15–17]. Использование тонких полосковых волноводов, полученных электронно-лучевой литографией, позволяет локализовать световое поле в значительно меньшем сечении волновода, чем при использовании традиционной диффузионной технологии. Это позволяет уменьшить расстояние между электродами бегущей волны. Кроме того, существуют технологии для расположения такого волновода не под электродами, а между ними. Все это позволяет добиться огромных напряженностей модулирующего поля в области волновода, а значит, и эффективной модуляции с большим количеством гармоник высших порядков [15] (рис. 7).

Another method for obtaining frequency combs is based on the possibility, with a certain selection of the control voltage, to use a Mach-Zehnder modulator to equalize the intensity of its output spectrum [10]. This idea is based on the possibility of adjusting the length of the arms of the Mach-Zehnder interferometer to reduce, if necessary, the intensity of even or odd harmonics. However, using only the spectrum equalization procedure is not enough – it is still necessary to obtain a sufficiently large number of comb peaks.

To solve this problem, modulator cascades were used [11–14]. In the simplest version, the light first passed through an amplitude modulator and then a phase one [11]. In more complex experiments, which demonstrated smoother and wider combs, a cascade of two modulators was supplemented by one more: an amplitude one at the input of the stage [12] or a phase one at the output [13]. The first of these cascades showed a wider ridge, but less intensity for each peak. In this regard, a further increase in the number of modulators was studied only for phase devices: in experiments with a cascade of three phase modulators with one amplitude modulator at the output, more than 70 spectral lines were obtained within -10 dB relative to the input power [14] (Fig. 6). Fig. 6 shows the output spectrum when using a cascade of modulators, consisting of three phase and one amplitude: from top to bottom: 73, 65 and 63 lines, respectively.

Another interesting area of research is lithium niobate film modulators [15–17]. The use of thin strip waveguides obtained by electron-beam lithography makes it possible to localize the light field in a much smaller section



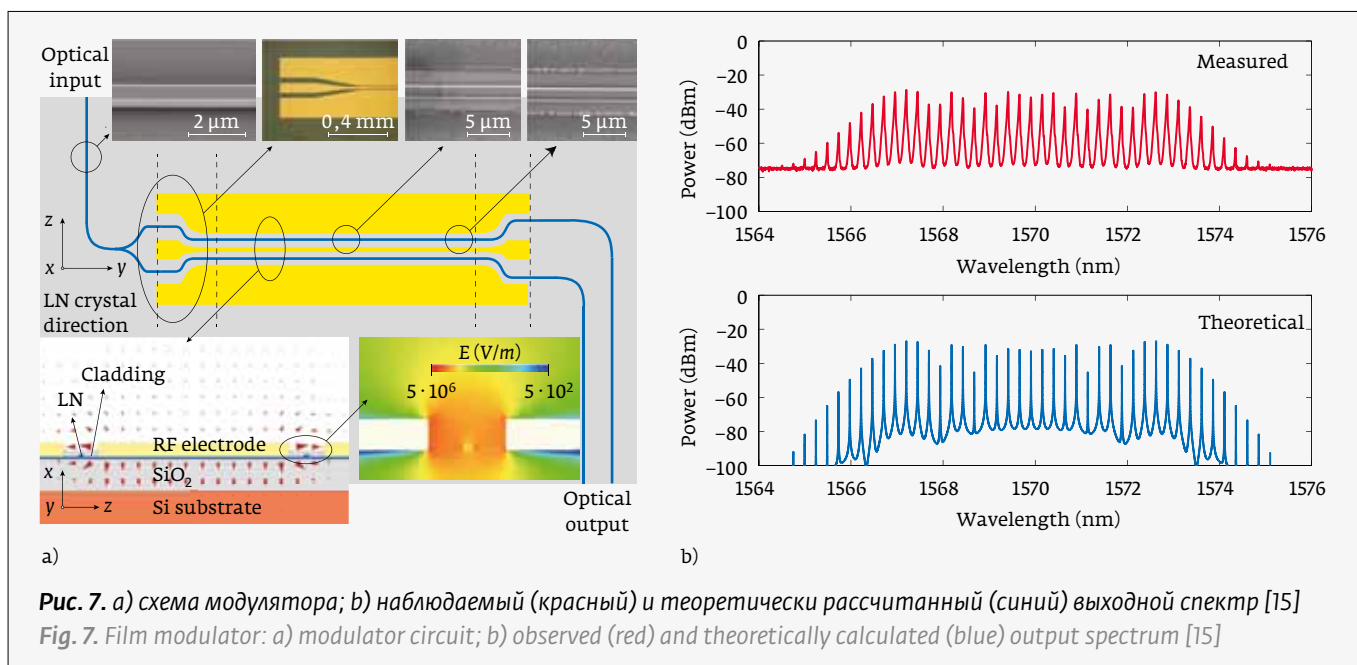


Рис. 7. а) схема модулятора; б) наблюдаемый (красный) и теоретически рассчитанный (синий) выходной спектр [15]  
 Fig. 7. Film modulator: a) modulator circuit; b) observed (red) and theoretically calculated (blue) output spectrum [15]

На рис. 7а приведена схема модулятора, на рис. 7б – измеренный (красный) и теоретический (синий) выходные спектры.

Кроме того, эта же технология позволяет получать интегрально-оптические кольцевые резонаторы крайне высокой добротности, которые сами по себе могут выступать источниками частотных гребенок за счет эффекта Керра [16, 18] (рис. 8).

На рис. 8а изображена схема эксперимента: в волоконный кольцевой резонатор помещен режекторный фильтр из волоконной брэгговской решетки. За счет резонатора при ослаблении основной частоты происходит перекачка энергии в боковые частоты (рис. 8б). Управление периодом частотной гребенки происходит за счет внесения расстройки между частотой накачки резонатора и параметрами фильтра: изменение частоты накачки без изменения центральной частоты фильтра приводит к сдвигу спектральных компонент высших порядков.

Однако возможно и совме-

щественное размещение описанных выше СВЧ-технологий для размещения такой волноводной структуры не под углом к волноводу, а при использовании традиционной диффузионной технологии. Это позволяет уменьшить расстояние между traveling wave электродами. Кроме того, существуют технологии для размещения такой волноводной структуры не под

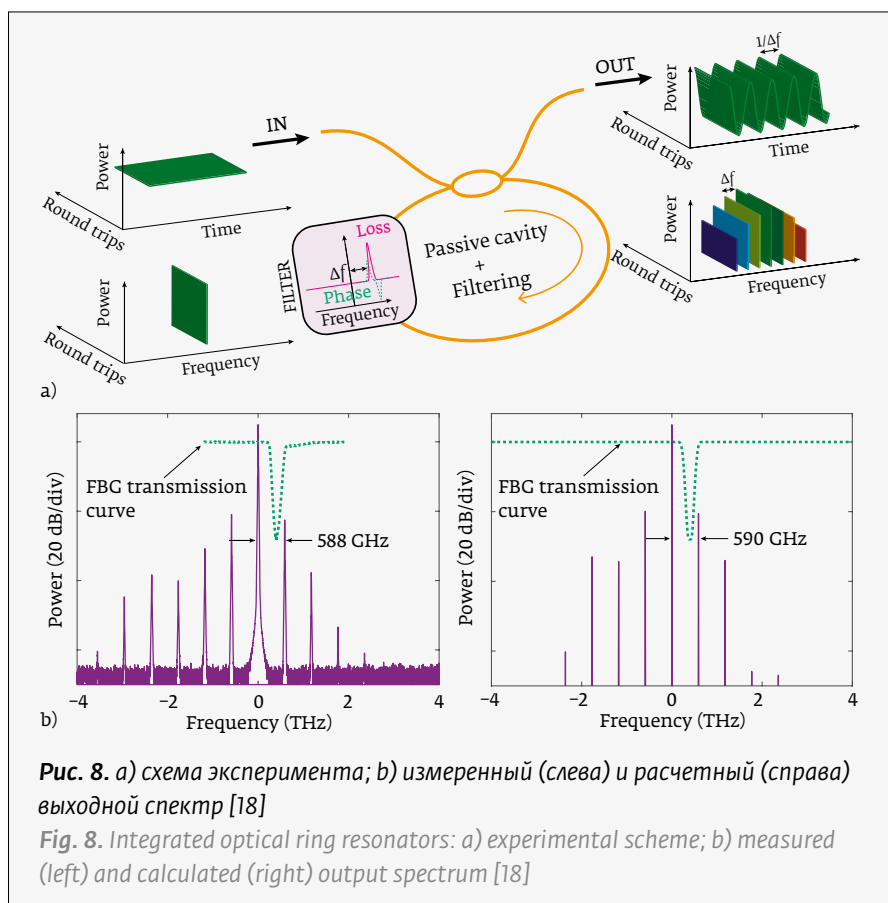


Рис. 8. а) схема эксперимента; б) измеренный (слева) и расчетный (справа) выходной спектр [18]

Fig. 8. Integrated optical ring resonators: a) experimental scheme; b) measured (left) and calculated (right) output spectrum [18]

модулятора и интегрального кольцевого резонатора, дающее хоть и менее широкую, но более ровную гребенку [17] (рис. 9).

На рис. 9а приведена схема модулятора (черным изображены оптические волноводы, желтым – электроды), на рис. 9б приведен выходной спектр – более 900 линий.

Как показал проведённый нами анализ литературы, достаточно хорошо исследованы схемы оптической генерации гребенчатой (comb) функции, которые содержат СВЧ оптический модулятор и петлю оптической обратной связи, содержащую оптический усилитель. Наличие оптического усилителя в таких схемах приводит к заметному негативному влиянию собственных шумов на формирование профиля гребенчатой функции.

Важно обратить внимание, что с точки зрения квантовых систем связи самым главным недостатком описываемых схем является наличие оптического усилителя. Согласно «Теореме Клонирования» [19] кванты света невозможно копировать, а следовательно, и усиливать. Это значит, что рас-

the electrodes, but between them. All this makes it possible to achieve huge modulating field strengths in the region of the waveguide, and hence effective modulation with a large number of higher-order harmonics [15] (Fig. 7). Fig. 7a shows a schematic of the modulator, Fig. 7b shows the measured (red) and theoretical (blue) output spectra.

In addition, the same technology makes it possible to obtain integrated optical ring resonators of extremely high Q-factor, which themselves can act as sources of frequency combs due to the Kerr effect [16, 18] (Fig. 8).

Fig. 8a shows a schematic diagram of the experiment: a notch filter made of a fiber Bragg grating is placed in a fiber ring resonator. Due to the resonator, when the fundamental frequency is attenuated, energy is transferred to the side frequencies (Fig. 8b). The frequency comb period is controlled by introducing a detuning between the pumping frequency of the resonator and the filter parameters: changing the pumping frequency without changing the center frequency of the filter leads to a shift in the spectral components of higher orders.

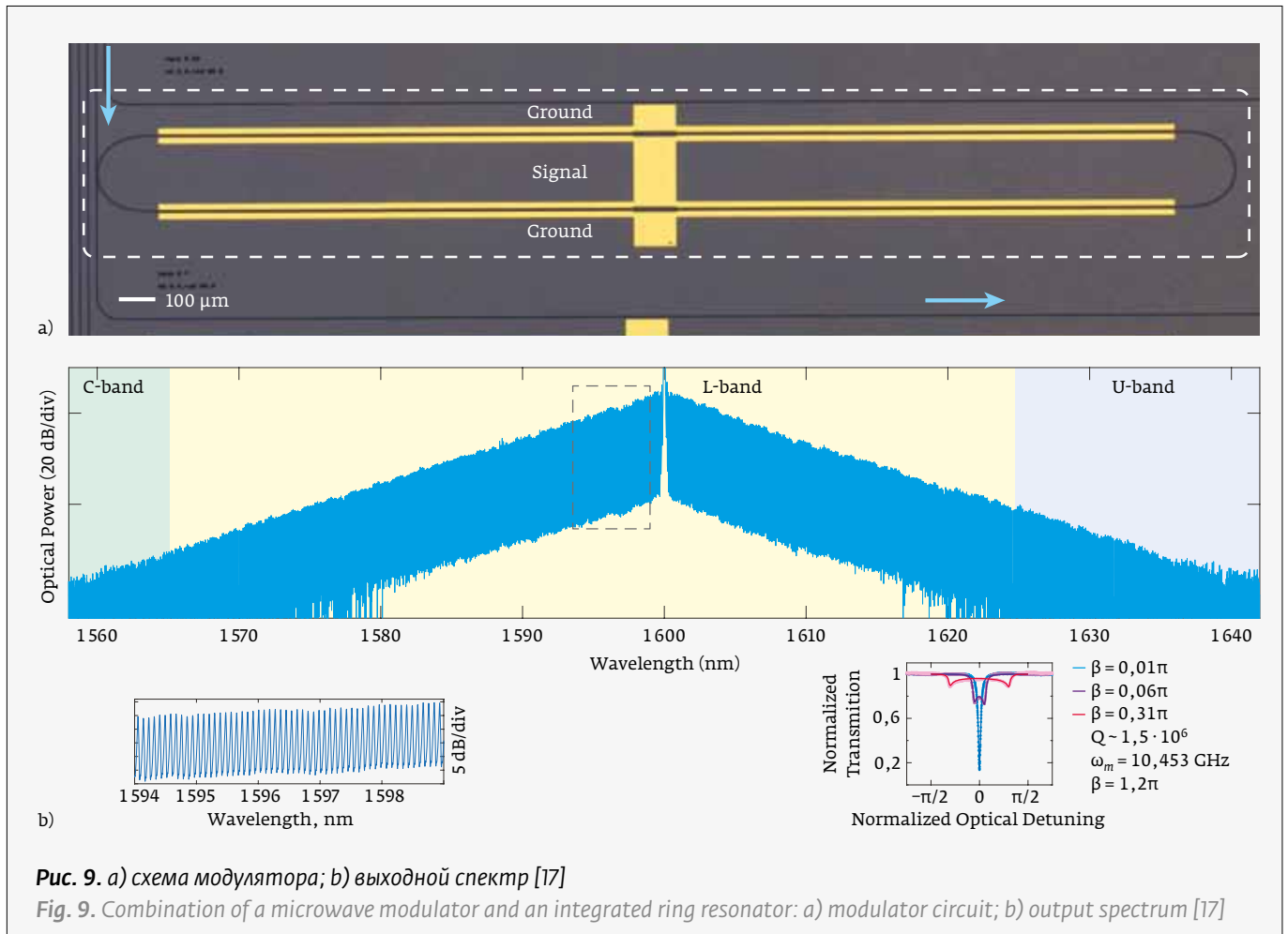


Рис. 9. а) схема модулятора; б) выходной спектр [17]

Fig. 9. Combination of a microwave modulator and an integrated ring resonator: a) modulator circuit; b) output spectrum [17]



мотренные выше схемы принципиально неприменимы для систем квантовых коммуникаций.

Таким образом, разработка схемы, не содержащей оптический усилитель, и при этом позволяющей кратно увеличивать количество генерируемых пар боковых частот, является актуальной задачей.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Нами были исследованы оптические спектры на выходе фазового СВЧ интегрально-оптического модулятора (ФМ) собственного производства [1]. Схема установки приведена на рис. 10. Нами использовался лазер с длиной волны 1550 нм, шириной спектральной линии <1 МГц и выходной мощностью 2 мВт. Петля обратной оптической связи была выполнена в виде отрезка волокна длиной  $L \approx 8,43$  м. Примерно посередине петли находился стандартный оптический разъем, который позволял «включать» и «выключать» обратную связь. При включении обратной связи большая часть оптической мощности с выхода ФМ поступала на его вход, что приводило к существенному увеличению числа высших гармоник в спектре сигнала.

В наших экспериментах использовались Y-ветвители двух типов: с коэффициентом деления 1:9 и 1:3. Наибольшее влияние обратной связи было обнаружено для ветвителя 1:9 (т. е. примерно 90% мощности направлялось в петлю обратной связи). На рис. 10а приведены спектры сигналов для случая «обычного» режима работы ФМ, на рис. 10б – для нелинейного режима работы с включённой петлей обратной оптической связи. Данные зависимости получены для частоты фазовой модуляции  $F=1,725$  ГГц.

Аналогичные эксперименты были проведены для Y-ветвителя с коэффициентом связи 1:3. В этом случае также наблюдались все характерные зависимости, однако влияние обратной связи было значительно меньшим.

Было исследовано влияние частоты фазовой модуляции на число высших спектральных компонент (при фиксированной длине петли обратной связи), (рис. 12а) и влияние

However, it is also possible to combine the above-described microwave modulator and an integral ring resonator, which gives, albeit a less wide, but smoother comb [17] (Fig. 9). Fig. 9a shows the schematic of the modulator (optical waveguides are shown in black, electrodes are shown in yellow), Fig. 9b shows the output spectrum – over 900 lines.

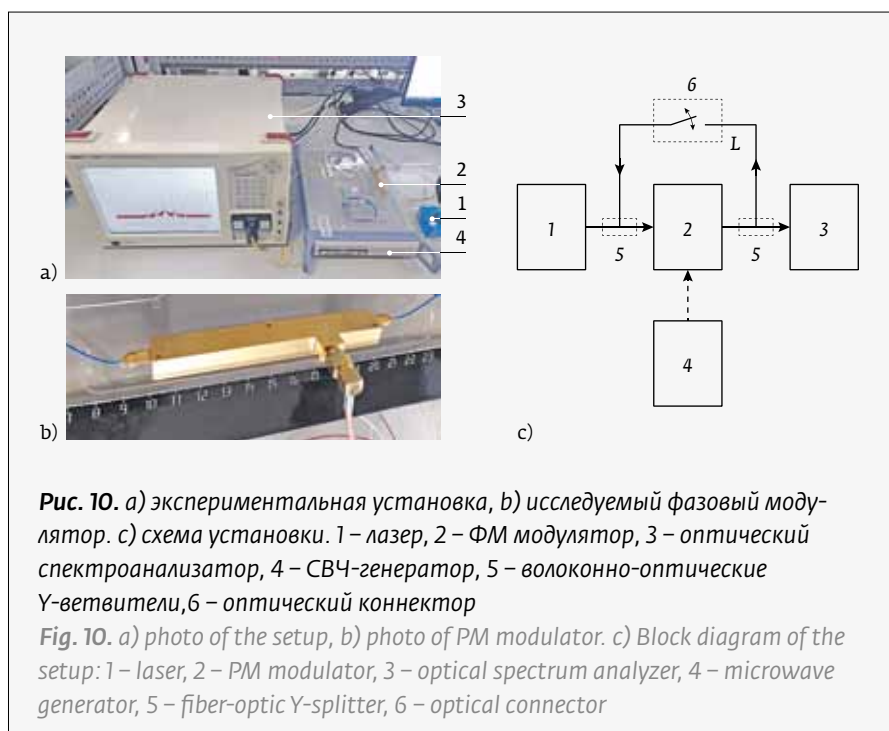
Our analysis of the literature has shown that schemes for the optical generation of the comb function, which contain a microwave optical modulator and an optical feedback loop containing an optical amplifier, have been studied quite well. The presence of an optical amplifier in such schemes leads to a noticeable negative effect of intrinsic noise on the formation of the profile of the comb function.

It is important to stress attention, that, from the point of view of quantum communication systems, the main drawback of the described schemes is the presence of an optical amplifier. According to the “Cloning Theorem” [19], light quanta cannot be copied and, consequently, amplified. This means that the schemes discussed above are fundamentally inapplicable for quantum communication systems.

Thus, the study of a circuit containing a microwave optical modulator and a feedback loop that does not contain an amplifier is an urgent task.

### EXPERIMENT

We have investigated the optical spectra at the output of a phase microwave integrated optical modulator (PM)



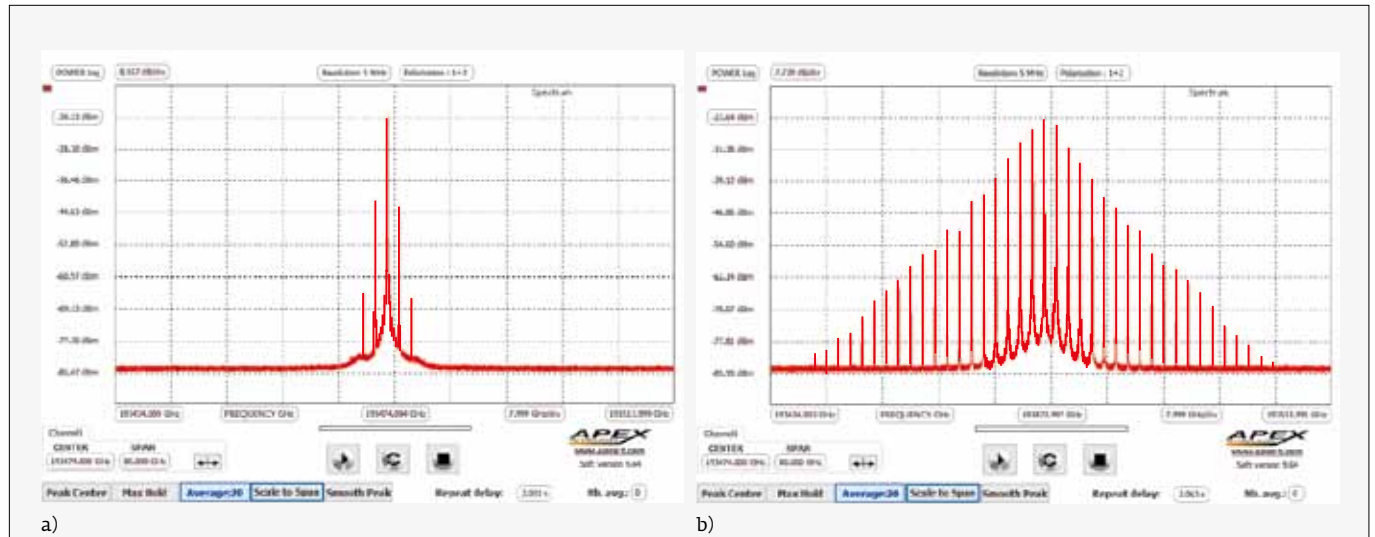
**Рис. 10.** а) экспериментальная установка, б) исследуемый фазовый модулятор. с) схема установки. 1 – лазер, 2 – ФМ модулятор, 3 – оптический спектроанализатор, 4 – СВЧ-генератор, 5 – волоконно-оптические Y-ветвители, 6 – оптический коннектор

**Fig. 10.** a) photo of the setup, b) photo of PM modulator. c) Block diagram of the setup: 1 – laser, 2 – PM modulator, 3 – optical spectrum analyzer, 4 – microwave generator, 5 – fiber-optic Y-splitter, 6 – optical connector

входной мощности сигнала фазовой модуляции (рис. 12b).

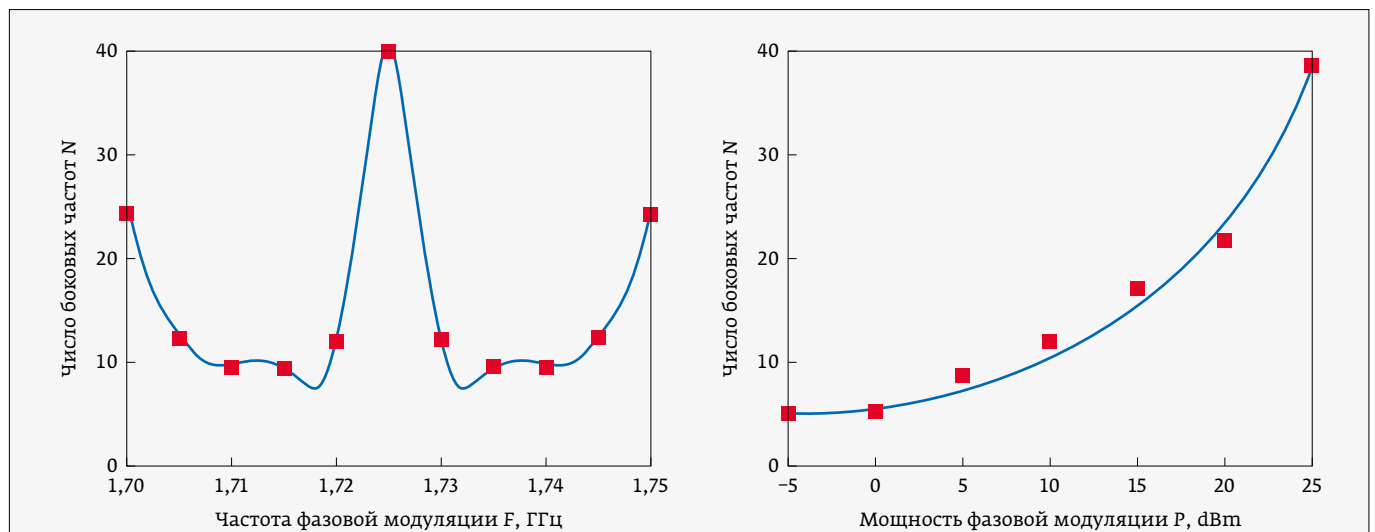
На рис. 12а показана зависимость числа спектральных компонент при включённой обратной связи от частоты модуляции при мощности 25 дБм.

of our own production [1]. The installation diagram is illustrated in Fig. 10. We used a laser with a wavelength of 1550 nm, a spectral line width of <1 MHz and an output power of 2 mW. The optical feedback loop was made in the form of a fiber segment  $L \approx 8.43$  m long. A standard optical



**Рис. 11.** Спектры сигналов на выходе ФМ модулятора, частота фазовой модуляции  $F = 1,725$  ГГц: а): величина сигнала  $-5$  дБм, б): величина сигнала 25 дБм, обратная связь включена

**Fig. 11.** Signal spectra at the output of the PM modulator, phase modulation frequency  $F = 1.725$  GHz: a) signal magnitude  $-5$  dBm, b) signal magnitude 25 dBm.



**Рис. 12. а):** Зависимость числа максимумов  $N$  от частоты фазовой модуляции (мощность 25 дБм). б): зависимость числа спектральных компонент от мощности сигнала фазовой модуляции на частоте 1,725 ГГц. Как показал наш дополнительный анализ, эта зависимость близка к квадратичной. Красные точки – экспериментальные данные, синие линии – их интерполяция

**Fig. 12.** Research results (red points – experimental data, blue lines – their interpolation): a) dependence of the number of maxima  $N$  on the phase modulation frequency (power 25 dBm); b) the dependence of the number of spectral components on the power of the phase modulation signal at a frequency of 1.725 GHz (as our additional analysis showed, this dependence is close to a quadratic function)



Из графика видно, что максимальное количество спектральных компонент наблюдалось при частоте модуляции 1,725 ГГц и составляло до 40 шт. (т. е. примерно по 20 с каждой стороны от несущей). Изменение частоты модуляции даже на 5 МГц приводило к тому, что число пиков сокращалось в два раза, причем наблюдалась четко выраженная симметричность зависимости для уменьшения и увеличения частоты модуляции в окрестностях пика. Увеличение числа максимумов у краев исследуемой области связано со следующими пиками, т. е. наблюдается периодичность зависимости.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы продемонстрировали эффективность использования оптической обратной связи для увеличения числа высших спектральных компонент. Предложенная нами схема является предельно простой: в качестве обратной связи используется только отрезок оптического волокна, что выгодно отличает нашу схему от всех других, рассмотренных в литературе. В нашей схеме не используются усилители, что позволяет снизить уровень шума по сравнению с экспериментами с использованием усилителей, и при этом в получающейся гребенке не возникает спектральных провалов, связанных со способом формирования обратной связи. Продемонстрированная на рис. 11а) периодичность зависимости числа спектральных компонент от частоты модуляции легко объясняется следующими соображениями: для возникновения резонанса необходимо, чтобы в длину петли обратной связи укладывалось целое число длин СВЧ-волн:  $l = c/f$ , где  $c$  – скорость света в вакууме,  $f$  – частота фазовой модуляции. В нашем эксперименте  $l \approx 0,17379$  м, и несложно подсчитать, что тогда в длину петли резонатора (8,52 м) укладывается 49 длин СВЧ-волн  $l$  с хорошей точностью.

Обсудим несколько примеров функциональных возможностей предложенной нами здесь схемы. Во-первых, система «лазер + СВЧ оптический модулятор с петлей обратной связи» может быть рассмотрена как источник излучения набора  $N$  когерентных колебаний. В наших экспериментах спектральный интервал  $\Delta F$  составлял 1,725 ГГц, а число  $N$  достигало в общей сложности 40 шт, следовательно, весь спектральный диапазон достигал  $40 \times 1,725$  ГГц = 69 ГГц. Очевидно что, меняя длину обратной связи нужным образом, можно подобрать спектральный интервал  $\Delta F$  так, чтобы он соответствовал стандартной сетке частот (H)DWDM, т. е. шагу 25, 50 или 100 ГГц. В этом случае один лазер может быть использован для обеспечения

connector was located approximately in the middle of the loop, which made it possible to “turn on” and “turn off” the feedback. When the feedback was switched on, most of the optical power from the output of the PM was fed to its input, which led to a significant increase in the number of higher harmonics in the signal spectrum.

In our experiments, two types of Y-branches were used: with a division ratio of 1:9 and 1:3. The greatest feedback effect was found for the 1:9 splitter (i. e. approximately 90% of the power was directed into the feedback loop). Fig. 11a shows the signal spectra for the case of the “normal” mode of operation of the PM, Fig. 11b – signal spectra for a nonlinear mode of operation with an included optical feedback loop. experimental dependences were obtained for the phase modulation frequency  $F=1.725$  GHz.

Similar experiments were carried out for a Y-branch with a coupling ratio of 1:3. In this case, all characteristic dependences were also observed, however, the influence of the feedback was much smaller.

The influence of the phase modulation frequency on the number of higher spectral components (at a fixed length of the feedback loop) (Fig. 12a) and the influence of the input power of the phase modulation signal (Fig. 12b) were investigated. Fig. 12a shows the dependence of the number of spectral components with the included feedback on the modulation frequency at a power of 25 dBm. It can be seen from the graph that the maximum number of spectral components was observed at a modulation frequency of 1.725 GHz and was up to 40 pieces (i. e., approximately 20 on each side of the carrier). Changing the modulation frequency even by 5 MHz led to the fact that the number of peaks was halved. Moreover, a clearly pronounced symmetry of the dependence was observed to decrease and increase the modulation frequency in the vicinity of the peak. An increase in the number of maxima at the edges of the study area is associated with the following peaks, i. e., a periodic recurrence of the dependence is observed.

### DISCUSSION OF THE RESULTS

We have demonstrated the effectiveness of using optical feedback to increase the number of higher spectral components. Our proposed scheme is extremely simple: only a piece of optical fiber is used as feedback, which favorably distinguishes our scheme from all others considered in the literature. The circuit we have demonstrated does not use amplifiers, which makes it possible to reduce the noise level compared to experiments using amplifiers. In this case, the resulting comb does not have spectral gaps associated with the method of feedback formation. As shown in Fig. 11a, the periodic recurrence of the dependence of the number of spectral components on the modulation frequency

работы сразу в нескольких частотных каналах. Другая интересная возможность – это «уместить» сразу большое число спектральных каналов в полосе одного стандартного спектрального канала. Обе эти опции востребованы в системах связи, использующих принцип CDMA (Code Division Multiple Access) или аналогичный.

Во-вторых, поскольку представленные здесь СВЧ интегрально-оптические модуляторы предназначены для использования в системах квантовых коммуникаций на боковых частотах, то наличие большого (до 20 шт.) числа высших гармоник открывает возможность передачи информации на различных парах боковых частот, что является дополнительной степенью защиты передачи данных.

В-третьих, заметным преимуществом нашей технологии является возможность существенно снизить требования, а следовательно, и стоимость, к самому СВЧ-генератору. Так, например, возможность работы на 10-й гармонике позволяет использовать генератор, создающий частоту фазовой модуляции  $F=1$  ГГц, что эквивалентно работе на первой гармонике генератора с частотой  $F=10$  ГГц.

И наконец, самое главное преимущество: отсутствие в нашей схеме оптического усилителя позволяет использовать её в системах квантовых коммуникаций.

Таким образом, рассмотренная здесь схема усиления нелинейностей в СВЧ интегрально-оптических модуляторах позволяют существенно расширить их функциональные возможности и снизить стоимость применительно к системам квантовых коммуникаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrov V. M., Shamrai A. V. et al. National microwave integrated optical modulators for quantum communications. *Photonics Russia*. 2020; 14(5): 414–423. DOI: 10.22184/1993–7296.  
Петров В. М., Шамрай А. В. и др. Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций. *Фотоника*. 2020; 14(5): 414–423. DOI: 10.22184/1993–7296.
2. Petrov V. M., Shamrai A. V. *Interference and Diffraction for Information Photonics*. – SPb.: Lan'. 2019. 460 pp.  
Петров В. М., Шамрай А. В. *Интерференция и дифракция для информационной фотоники*. – СПб.: Лань. 2019. 460 с.
3. Ho K. P., Kahn J. M. Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop. *IEEE photonics technology letters*. 1993; 5(6): 721–725. DOI: 10.1109/68.219723.
4. Kawanishi T. et al. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation. *IEICE Electronics Express*. 2004; 1(8): 217–221. DOI: 10.1109/CLEOPR.1999.817825.
5. Kogahara S. et al. Reciprocating Optical Modulation on Erbium-Doped LiNbO<sub>3</sub> for Harmonic Generation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2007; 19(19): 1565–1567. DOI: 10.1109/QELS.2007.4431438.
6. Kawanishi T. et al. Reciprocating optical modulation for harmonic generation. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2001; 13(8): 854–856. DOI: 10.1109/68.935826.

is easily explained by the following considerations. For resonance to occur, it is necessary that an integer number of microwave wavelengths fit into the feedback loop length:  $l=c/F$ , where  $c$  is the speed of light in vacuum,  $F$  is the phase modulation frequency. In our experiment,  $l \approx 0.17379$  m, and it is easy to calculate that then 49 microwave wavelengths  $l$  fit into the cavity loop length (8.52 m) with good accuracy.

Let's discuss several examples of the functionality of the scheme we proposed here. First, the "laser + microwave optical modulator with a feedback loop" system can be considered as a radiation source of a set of  $N$  coherent oscillations. In our experiments, the spectral interval  $\Delta F$  was 1.725 GHz, and the number  $N$  reached a total of 40 pieces. Consequently, the entire spectral range reached  $40 \times 1.725$  GHz = 69 GHz. Obviously, by changing the feedback length as needed, one can select the spectral interval  $\Delta F$  so that it corresponds to the standard (H)DWDM frequency grid, i.e. steps of 25, 50, or 100 GHz. In this case, one laser can be used to provide operation in several frequency channels at once.

Another interesting possibility is to "fit" a large number of spectral channels at once in the band of one standard spectral channel. Both of these options are in demand in communication systems using the CDMA



For us, optical fiber is as pure as nature.

**WE LOVE PURE RESULTS**  
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KNILL GRUPP MADE IN EUROPE



7. **Kawanishi T.** Reciprocal optical modulation for millimeter-wave generation by using a dual-section fiber Bragg grating. *Journal of lightwave technology*. 2002; 20(8): 1408–1415. DOI: 10.1109/JLT.2002.800340.
8. **Sakamoto T.** Optoelectronic oscillator using a LiNbO<sub>3</sub> phase modulator for self-oscillating frequency comb generation. *Optics letters*. 2006; 31(6): 811–813. DOI: 10.1364/OL.31.000811.
9. **Logan R. T.** Stabilization of oscillator phase using a fiber-optic delay-line. *Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control* 1991. 1991; 508–512. DOI: 10.1109/FREQ.1991.145943.
10. **Sakamoto T.** Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator. *Optics letters*. 2007; 32(11): 1515–1517. DOI: 10.1364/OL.32.001515.
11. **Dou Y.** Improvement of flatness of optical frequency comb based on nonlinear effect of intensity modulator. *Optics letters*. 2011; 36(14): 2749–2751. DOI: 10.1364/OL.36.002749.
12. **Wu R. et al.** Generation of very flat optical frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms. *Optics letters*. 2010; 35(19): 3234–3236. DOI: 10.1364/OL.35.003234.
13. **Dou Y.** Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012; 24(9): 727–729. DOI: 10.1109/LPT.2012.2187330.
14. **Metcalf A. J. et al.** High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2013; 19(6): 231–236. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2268384.
15. **Ren T. et al.** An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2019; 31(11): 889–892. DOI: 10.1109/LPT.2019.2911876.
16. **Wang C. et al.** Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation. *Nature communications*. 2019; 10(1): 1–6. DOI: 10.1038/s41467-019-08969-6.
17. **Bessin, F. et al.** Gain-through-filtering enables tuneable frequency comb generation in passive optical resonators. *Nature communications*. 2019; 10(4489). DOI: 10.1038/s41467-019-12375-3.
18. **Zhang M. et al.** Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator. *Nature*. 2019; 568(7752): 373–377. DOI: 10.1038/s41586-019-1008-7.
19. **Wootters W. et al.** A Single Quantum Cannot be Cloned. *Nature*. 1982; 92(6): 271–271. DOI: 10.1038/299802A0.

## АВТОРЫ

- Петров Виктор Михайлович, д. ф.-м. н. (радиофизика), д. ф.-м. н. (оптика), vmpetrov@itmo.ru, г.н.с., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0002 8523 0336
- Герасименко Наталья Дмитриевна, инж., Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0002 6039 9485
- Герасименко Владислав Сергеевич, инж., факультет фотоники и оптоинформатики, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0002 9709 3850
- 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
- Ильичев Игорь Владимирович, к. х. н., с.н.с., лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0001 7803 0630
- Агрозов Пётр Михайлович, м.н.с., лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0002 1248 7069
- Лебедев Владимир Владимирович, к. ф.-м. н., м.н.с., лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.  
ORCID: 0000 0002 3277 2756

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

(Code Division Multiple Access) principle, or another similar method.

Secondly, since the microwave integrated optical modulators presented here are intended for use in quantum communication systems at side frequencies, the presence of a large (up to 20 pieces) number of higher harmonics opens up the possibility of transmitting information at various pairs of side frequencies. This is an additional level of data transmission protection.

Thirdly, a significant advantage of our technology is the ability to significantly reduce the requirements, and, consequently, the cost, to the microwave generator itself. So, for example, the ability to work at the 10th harmonic allows you to use a generator that creates a phase modulation frequency of  $F=1$  GHz, which is equivalent to operating at the first harmonic of the generator with a frequency of  $F=10$  GHz.

And, finally, the most important advantage: the absence of an optical amplifier in our scheme allows us to use it in quantum communication systems.

Thus, the scheme considered here for amplifying nonlinearities in microwave integrated optical modulators can significantly expand their functionality and reduce the cost as applied to quantum communication systems.

## ABOUT AUTHORS

Viktor Petrov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Radiophysics), Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Optics) vmpetrov@itmo.ru, Chief Researcher, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0002 8523 0336

Gerasimenko Natalya Dmitrievna, Engineer, National Research University ITMO, Faculty of Photonics and Optoinformatics, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0002 6039 9485

Gerasimenko Vladislav Sergeevich, Engineer, Faculty of Photonics and Optoinformatics, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0002 9709 3850

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

Il'ichev Igor Vladimirovich, candidate of chemical sciences, senior researcher, lab. of Quantum Electronics Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0001 7803 0630

Agruzov Petr Mikhailovich, junior researcher, lab. of Quantum Electronics Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0002 1248 7069

Lebedev Vladimir Vladimirovich, junior researcher, lab. of Quantum Electronics Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe, St. Petersburg, Russia.  
ORCID: 0000 0003 0292 8673

## 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.

ОРГАНИЗАТОРЫ



АДМИНИСТРАЦИЯ  
ГОРОДСКОГО ОКРУГА  
ГУБА РБ



ПОДДЕРЖКА



МИНИСТЕРСТВО СЕМЬИ,  
ТРУДА И СОЦИАЛЬНОЙ  
ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ РБ



РОССИЙСКАЯ  
АССОЦИАЦИЯ  
«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»



# РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

## Специализированные выставки

- **Машиностроение**
- **Металлообработка**
- **Средства защиты**
- **Инновационный потенциал Уфы**

Мероприятия проводятся с учетом всех  
требований Роспотребнадзора



**3-5 марта**  
**ВДНХ ЭКСПО УФА 2021**



[www.prombvk.ru](http://www.prombvk.ru)

+7 (347) 246 41 80, 246 41 77

[promexpo@bvkeexpo.ru](mailto:promexpo@bvkeexpo.ru)



[prombvk](https://www.facebook.com/prombvk)



[promexpoufa](https://www.instagram.com/promexpoufa)

#рпфуфа

#промфорумуфа

# УНИКАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

## ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ ГРАДИЕНТНЫЕ ЛИНЗЫ

NEW!

Градиентная линза **IPG-GRL-18-55-048** - оптический элемент в виде цилиндра с плоскими полированными торцами. Градиентная линза является основой современных микрооптических устройств, предназначенных для фокусировки и коллимации излучения, передачи и трансформации изображения.



### ПРАКТИЧЕСКОЕ ОТСУТСТВИЕ СФЕРИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ

Минимальные сферические aberrации, обусловленные градиентным распределением показателя преломления, делают их незаменимыми при создании элементной базы волоконно-оптических линий связи, контрольно-измерительной аппаратуры систем связи и передачи информации, медицинских устройств.



#### Преимущества

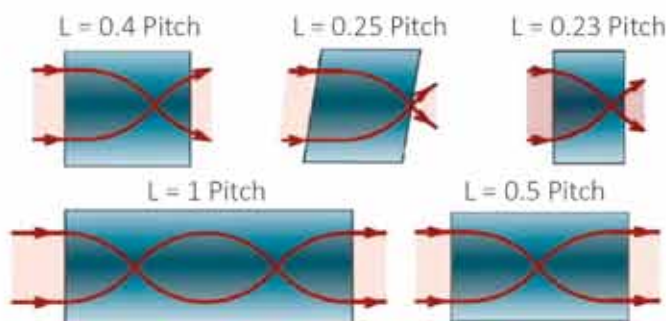
Параметры линзы определяются радиальным градиентом показателя преломления

Плоскопараллельные торцы

Большая посадочная поверхность (цилиндрическая)

Формирование параметров линзы (фокусное расстояние, рабочий отрезок, расходящийся / сходящийся / коллимированный пучок на выходе) подбором ее длины

Собственная разработка с гарантией качества



# НЕПРЕВЗОЙДЁННАЯ НАДЁЖНОСТЬ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

**НТО "ИРЭ-Полюс"** производит различные компоненты, включая диоды накачки, волоконные брэгговские решетки, акусто-оптические модуляторы, объединители, ответвители, оптические изоляторы, активное волокно, коллиматоры и другие компоненты.



## СОБСТВЕННАЯ РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО

**НТО "ИРЭ-Полюс"** разрабатывает и серийно производит высокоэффективные волоконные лазеры и усилители, оптические компоненты, узлы, модули, приборы, подсистемы и системы для:

- Промышленных комплексов лазерной резки, сварки, наплавки, термообработки, маркировки, очистки и т.д.
- Оптической локации, дистанционного контроля промышленных объектов и атмосферы
- Контрольно-измерительных систем, сенсорики
- Научных исследований
- Волоконной, атмосферной и спутниковой оптической связи, кабельного телевидения
- Хирургии и биомедицины

НТО «ИРЭ-Полюс» является вертикально интегрированной компанией, производящей все компоненты для своих законченных продуктов, включая диоды накачки, акустооптические модуляторы, изоляторы, объединители, ответвители, оптическое волокно и другие компоненты.