



Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций

В. М. Петров¹, А. В. Шамрай², И. В. Ильичев²,
П. М. Агрозов², В. В. Лебедев²,
Н. Д. Герасименко¹, В. С. Герасименко¹

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты исследования характеристик интегрально-оптических модуляторов обоих типов – амплитудных и фазовых, разработанных и созданных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе совместно с Университетом ИТМО для систем квантовых коммуникаций. Впервые в отечественной практике для изготовления опытных образцов модуляторов были использованы оригинальные технологии формирования оптических волноводов методом термической диффузии ионов титана на кристаллических подложках X- и Z-срезов ниобата лития и формирования СВЧ электродов бегущей волны на основе гальванического серебра с последующим золочением. Проведена оценка основных эксплуатационных характеристик модуляторов. Выявлено влияние конструкции корпуса и качества сборки модуляторов на их основные параметры.

Ключевые слова: квантовые коммуникации, квантовая рассылка ключа, СВЧ интегрально-оптические модуляторы, эксплуатационные характеристики модуляторов

Статья получена: 11.07.2020
Принята к публикации: 25.07.2020

National Microwave Integrated Optical Modulators for Quantum Communications

V. M. Petrov¹, A. V. Shamrai², I. V. Il'ichev², P. M. Agruzov²,
V. V. Lebedev², N. D. Gerasimenko¹, V. S. Gerasimenko¹

¹ ITMONational Research University, St. Petersburg, Russia

² A. F. Ioffe PTI of RAS, St. Petersburg, Russia

The results of studying the characteristics of integrated optical modulators of both types, amplitude and phase, developed and created at the A. F. Ioffe PTI jointly with ITMO University for quantum communication systems are presented in the article. For the first time in national practice, original technologies for the formation of optical waveguides by the method of thermal diffusion of titanium ions on crystalline substrates of X- and Z-cuts of lithium niobate and the formation of microwave traveling wave electrodes based on galvanic silver with subsequent gilding were used to manufacture prototypes of modulators. The assessment of the main operational characteristics of the modulators is carried out. The influence of the housing design and the quality of assembly of modulators on their main parameters is revealed.

Keywords: quantum communications, quantum key distribution, microwave integrated optical modulators, modulator performance characteristics

Received on: 11.07.2020

Accepted on: 25.07.2020

INTRODUCTION

Microwave integrated optical modulators provide high-speed information input into the optical communication line. With amplitude or phase modulation in the spectrum of an optical carrier, so-called “side” frequencies. The technology of quantum key distribution (QKD) using side frequencies [1] is the base for the development and creation of quantum communication lines, including the first experimental quantum communication line Moscow – St. Petersburg [2]. The active development of national systems of quantum communication, including



ВВЕДЕНИЕ

СВЧ интегрально-оптические модуляторы обеспечивают высокоскоростной ввод информации в линию оптической связи. При амплитудной или фазовой модуляции в спектре оптической несущей возникают т.н. «боковые» частоты. Технология квантовой рассылки ключа (КРК) с использованием боковых частот [1] является базовой для разработки и создания квантовых линий связи, в том числе первой экспериментальной линии квантовой связи Москва – Санкт-Петербург [2]. Активное развитие отечественных систем квантовой связи, включая квантовый Интернет, требует использования соответствующей элементной базы.

Построение системы КРК на боковых частотах подразумевает использование как амплитудных (АМ), так и фазовых (ФМ) оптических модуляторов, работающих в диапазоне частот 3–30 ГГц. Как показал наш анализ, для обеспечения требований системы КРК на боковых частотах необходимо использовать электрооптические модуляторы на основе оптических волноводов на подложках ниобата лития. Они имеют самый низкий уровень вносимых шумов (примерно -156 дБВ_п) по сравнению с альтернативными технологиями, использующими полупроводниковые материалы A_3B_5 и кремний. При этом применение в системах КРК выдвигает особые требования к качеству оптических волноводов, которые должны обеспечивать минимальный уровень оптических потерь для работы с оптическими сигналами в режиме счета единичных фотонов. Необходимая ширина полосы модуляции обеспечивается использованием электродов бегущей волны на основе копланарной линии [3–5].

Основными характеристиками интегрально-оптических модуляторов на основе ниобата лития являются: ширина полосы модуляции, полуволновое напряжение и оптические потери. Данные характеристики совместно с характеристиками источника оптического излучения (лазера) и фотоприемника определяют результирующие информационные характеристики системы связи, такие как пропускная способность.

Цель данной работы – продемонстрировать, что разработанные отечественные интегрально-оптические модуляторы по своим характеристикам полностью соответствуют требованиям современных систем КРК и позволяют получить высокую пропускную способность в волоконно-оптической линии, использующей в качестве источника излучения стандартный полупроводниковый лазерный диод.

the quantum Internet, requires the use of an appropriate element base.

The construction of a QKD system at side frequencies implies the use of both amplitude (AM) and phase (PM) optical modulators operating in the frequency range of 3–30 GHz. As our analysis has shown, to meet the requirements of the QKD system at side frequencies, it is necessary to use electro-optical modulators based on optical waveguides on lithium niobate substrates. They have the lowest introduced noise (approximately -156 дБВ_п) compared to alternative technologies using A_3B_5 semiconductor materials and silicon. At the same time, their use in QKD systems puts forward special requirements for the quality of optical waveguides, which should provide a minimum level of optical losses for working with optical signals in the single photon counting mode. The required modulation bandwidth is provided by using traveling wave electrodes based on a coplanar line [3–5].

The main characteristics of integrated optical modulators based on lithium niobate are: modulation bandwidth, half-wave voltage and optical loss. These characteristics, together with the characteristics of the optical radiation source (laser) and the photodetector, determine the resulting information characteristics of the communication system, such as throughput.

The purpose of this work is to demonstrate that the developed domestic integrated-optical modulators in their characteristics fully meet the requirements of modern QKD systems and make it possible to obtain high throughput in a fiber-optic line using a standard semiconductor laser diode as a radiation source.

ARRANGEMENT OF INTEGRATED OPTICAL MODULATORS

In this work, we investigated both types of integrated optical modulators on lithium niobate substrates (AM and PM) used in QKD systems (Fig. 1a, b).

AM is a waveguide Mach-Zehnder interferometer (MZI) and is manufactured on X-cut lithium niobate substrates. The modulator operates with linearly polarized optical radiation lying in the plane of the substrate (TE mode). The working polarization mode was separated using a waveguide plasmon-polariton polarizer [6]. Traveling wave microwave electrodes are made on the basis of galvanic silver with surface gilding and have the configuration of a coplanar microwave line [7]. The optical waveguides of the two arms of the MZI are located in the interelectrode gap of the coplanar microwave line, providing the application of a field of opposite polarity to different arms of the MZI. The configuration of the electrodes was calculated from the condition of ensuring the matching of the phase velocity of optical radiation

УСТРОЙСТВО ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

В данной работе были исследованы оба типа интегрально-оптических модуляторов на подложках ниобата лития (АМ и ФМ), использующиеся в системах КРК (рис. 1а, б).

АМ представляет из себя волноводный интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ) и изготавливается на подложках ниобата лития X-среза. Модулятор работает с линейно-поляризованным оптическим излучением, лежащим в плоскости подложки (ТЕ-мода). Выделение рабочей поляризационной моды осуществлялось волноводным плазмон-поляритонным поляризатором [6]. СВЧ-электроды бегущей волны изготавливаются на основе гальванического серебра с поверхностным золочением и имеют конфигурацию копланарной СВЧ-линии [7]. Оптические волноводы двух плеч ИМЦ располагаются в межэлектродном зазоре копланарной СВЧ-линии, обеспечивая приложение к разным плечам ИМЦ поля противоположной полярности. Конфигурация электродов была рассчитана из условия обеспечения согласования фазовой скорости оптического излучения и групповой скорости СВЧ-волны с точностью 0,1% (рис. 2).

ФМ – это одиночный прямой оптический волновод, который в отличие от АМ изготавливается на подложке Z-среза ниобата лития и работает с линейно-поляризованным оптическим излучением, перпендикулярным плоскости подложки (ТМ-мода). Волновод размещается под центральным, «горячим» электродом копланарной СВЧ-линии, что обеспечивает максимальный интеграл перекрытия модулирующего СВЧ-поля и моды оптического волновода.

Важно отметить, что для изготовления оптических волноводов с чрезвычайно малыми потерями (менее 0,01 дБ/мм) была отработана оригинальная технология диффузии ионов титана с предварительным окислением и специальными мерами подавления обратной диффузии лития [8].

and the group velocity of the microwave wave with an accuracy of 0.1% (Fig. 2).

A PM is a single direct optical waveguide, which, unlike AM, is fabricated on a Z-cut lithium niobate substrate and operates with linearly polarized optical radiation perpendicular to the plane of the substrate (TM mode). The waveguide is placed under the central, “hot” electrode of the coplanar microwave line, which provides the maximum overlap integral of the modulating microwave field and optical waveguide mode.

It is important to note that for the manufacture of optical waveguides with extremely low losses (less than 0.01 dB/mm), the original technology of diffusion of titanium ions with preliminary oxidation and special measures to suppress the reverse diffusion of lithium was developed [8].

Special attention was paid to the development of the design of the housing of microwave modulators and technical solutions for assembly into the housing. First of all, special measures were taken to suppress parasitic resonances associated with the excitation of microwave modes of the substrate [9]. Chips of integrated optical

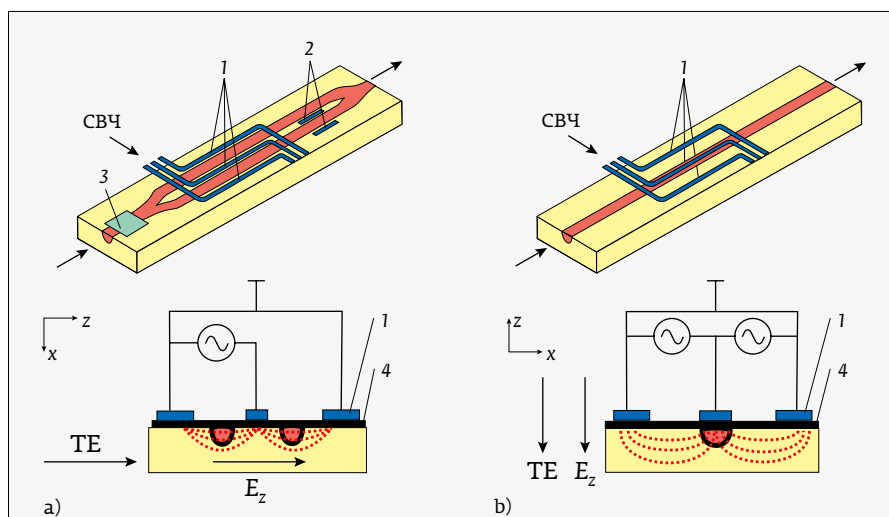


Рис. 1. Конфигурации интегрально-оптических модуляторов на подложках ниобата лития, геометрия электродов бегущей волны и электрических полей оптического излучения и СВЧ-волны: а) амплитудный модулятор: X-срез подложки, волноводы образуют интерферометр Маха-Цендера; б) фазовый модулятор: Z-срез подложки, прямой оптический волновод; (1 – электроды бегущей волны, 2 – DC-электроды управления рабочей точкой, 3 – входной поляризатор, 4 – диэлектрический подслой SiO₂)

Fig. 1. Configurations of integrated optical modulators on lithium niobate substrates, geometry of traveling wave electrodes and electric fields of optical radiation and microwave waves: a) amplitude modulator: X-cut of the substrate, waveguides form a Mach-Zehnder interferometer; b) phase modulator: substrate Z-cut, direct optical waveguide; (1 – traveling wave electrodes, 2 – DC electrodes for operating point control, 3 – input polarizer, 4 – dielectric SiO₂ sublayer)

Особое внимание было уделено разработке конструкции корпуса СВЧ-модуляторов и техническим решениям сборки в корпус. Прежде всего принимались специальные меры по подавлению паразитных резонансов, связанных с возбуждением СВЧ-мод подложки [9]. Чипы интегрально-оптических модуляторов были состыкованы пigtэйлами на основе одномодового оптического волокна с сохранением поляризации методом приклейки в торец. Электрические соединения были выполнены через переходные платы, обеспечивающие дополнительную функцию согласования с входным СВЧ-трактом 50 Ом.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯТОРОВ

Измерения характеристик модуляторов проводили на двух установках. Частотные характеристики электрооптического преобразования измеряли как параметры S_{21} и S_{11} с использованием векторного анализатора цепей ROHDE-SCWARZ ZNB40, обеспечивающего измерения электрического сигнала в полосе до 40 ГГц (рис. 3а).

В качестве источника когерентного излучения (2) использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения $\lambda \approx 1552$ нм, шириной спектра <1 МГц и выходной мощностью ≈ 8 мВт.

modulators were joined by pigtailed based on single-mode optical fiber with polarization retention by gluing to the end. The electrical connections were made through adapter cards providing an additional function of matching with the 50 Ω microwave input path.

MODULATOR CHARACTERISTICS

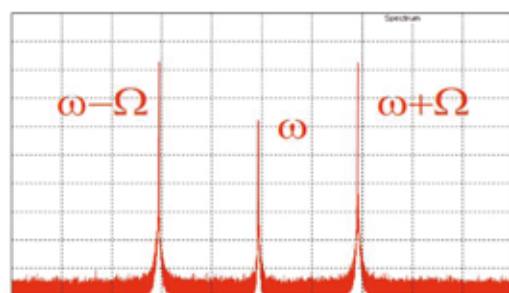
The measurements of the characteristics of the modulators were carried out on two installations. The frequency characteristics of the electro-optical conversion were measured as parameters S_{21} and S_{11} using a ROHDE-SCWARZ ZNB40 vector network analyzer, which provides measurements of an electrical signal in a band up to 40 GHz (Fig. 3a).

A semiconductor laser with a radiation wavelength of $\lambda \approx 1552$ nm, a spectrum width of <1 MHz and an output power of ≈ 8 mW was used as a source of coherent radiation (2). The calibrated photodetector (4) had a bandwidth of ≈ 50 GHz. The parameters are the transmission coefficient (S_{21}) and the reflection coefficient (S_{11}) of the microwave signals in the measurement system. In fig. 4 shows the dependence of the parameters S_{21} and S_{11} of the amplitude modulator on the modulation frequency F .

As can be seen from the above dependence of the gain $S_{21}(F)$, the bandwidth of modulators B can be estimated at 20 GHz using the criterion for the frequency response



ПРОЕКТИРУЕМ И ПРОИЗВОДИМ
В РОССИИ



Высококачественные СВЧ интегрально-оптические АМ- и ФМ- модуляторы Отечественной разработки для оптической, радиофотонной и квантовой связи. Предельно-малые оптические потери, частота модуляции от Ω до 40 ГГц, полуволновое напряжение не более 6 в, стандартные одномодовые или РМ волокна на входе и выходе модулятора, дополнительные опции под заказ.

ООО «ИНТЕГРА»

www.inphotonics.ru
info@inphotonics.ru
Тел.: +7 (812) 324-45-69

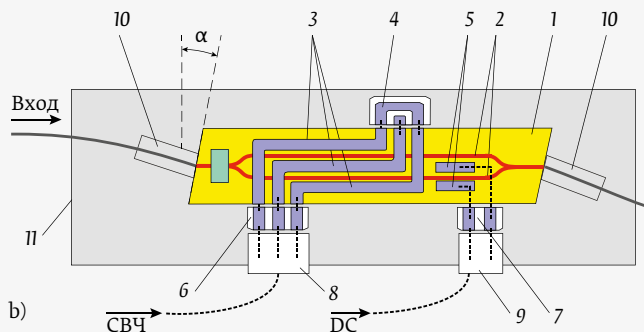


Рис. 2. Амплитудный оптический модулятор: а) АМ-модулятор в сборке со снятой верхней крышкой (ориентировочные габариты корпуса $90 \times 9 \times 9$ мм³; корпус изготавливается из латуни и покрывается слоем золота толщиной 5 мкм); б) конструкция АМ-модулятора в корпусе (масштаб произвольный): 1 – подложка ниобата лития; 2 – оптические волноводы, образующие ИМЦ; 3 – СВЧ-электроды бегущей волны; 4 – согласованная нагрузка; 5 – низкочастотные электроды управления рабочей точкой; 6, 7 – переходные платы; 8, 9 – электрические разъемы; 10 – стыковочные упрочняющие элементы волоконно-оптических пigtэйлов; 11 – корпус; 12 – входной поляризатор

Fig. 2. Amplitude optical modulator: а) AM modulator in the assembly with the top cover removed (the approximate dimensions of the case are $90 \times 9 \times 9$ mm³; the case is made of brass and covered with a layer of gold 5 μm thick); б) design of an AM modulator in a housing (arbitrary scale): 1 – lithium niobate substrate; 2 – optical waveguides forming the MZI; 3 – microwave traveling wave electrodes; 4 – matched load; 5 – low-frequency electrodes for operating point control; 6, 7 – transition boards; 8, 9 – electrical connectors; 10 – docking reinforcing elements of fiber-optic pigtailed; 11 – case; 12 – input polarizer

Калиброванный фотоприемник (4) имел ширину полосы ≈ 50 ГГц. Параметры представляют собой коэффициент передачи (S_{21}) и коэффициент отражения (S_{11}) СВЧ-сигналов в измерительной системе. На рис. 4 показаны зависимости параметров S_{21} и S_{11} амплитудного модулятора от частоты модуляции F .

Как видно из приведенной зависимости коэффициента передачи $S_{21}(F)$, ширину полосы частот модуляторов В можно оценить в 20 ГГц, используя критерий спада АЧХ на 3 дБ. Начальный участок зависимости, имеющий характерный максимум в интервале примерно 0–2 ГГц, как правило, не рассматривается [4, 9]. Поэтому для дальнейших оценок будем использовать границы рабочей полосы от 2 до 22 ГГц.

Отметим, что зависимость $S_{21}(F)$ в интервале 15–20 ГГц имеет волнообразный характер (рис. 4а, с). Из сравнения ее с зависимостью $S_{11}(F)$ видно, что максимумы отражения мощности модулирующего СВЧ-

roll-off by 3 dB. The initial section of the dependence, which has a characteristic maximum in the range of about 0–2 GHz, is usually not considered [4, 9]. Therefore, for further estimates, we will use the boundaries of the operating band from 2 to 22 GHz.

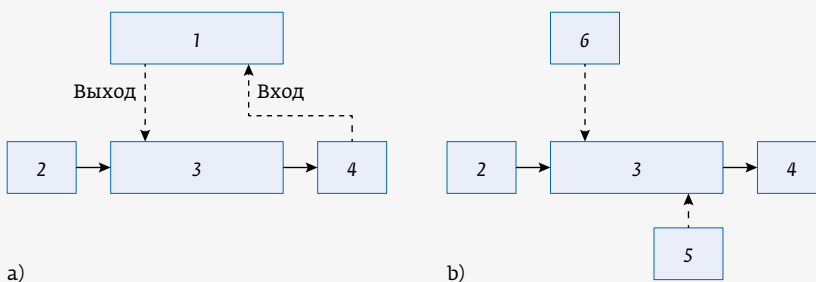


Рис. 3. Блок-схемы измерительных установок для определения параметров модуляторов: а) для измерения параметров S_{21} и S_{11} ; б) для измерения оптических спектров; (1 – векторный анализатор цепей, 2 – лазер, 3 – исследуемый образец модулятора, 4 – калиброванный фотоприемник, 5 – источник управления рабочей точкой, 6 – СВЧ-генератор, 7 – спектроанализатор)

Fig. 3. Block diagrams of measuring installations for determining the parameters of modulators: а) for measuring the parameters S_{21} and S_{11} ; б) for measuring optical spectra; (1 – vector network analyzer, 2 – laser, 3 – sample of the modulator under study, 4 – calibrated photodetector, 5 – operating point control source, 6 – microwave generator, 7 – spectrum analyzer)

сигнала совпадают с минимумами коэффициента передачи. Это говорит о том, что в СВЧ-тракте модулятора есть переотражения. Они могут быть связаны с неоптимальной конфигурацией и недостаточно точной установкой в корпус модулятора переходных СВЧ-плат. Заметный спад в частотной зависимости коэффициента передачи $S_{21}(F)$, начиная с частоты 30 ГГц, обусловлен использованием СВЧ-разъема, для которого 30 ГГц является предельной частотой согласно техническому описанию.

На рис. 4с, d представлены зависимости $S_{21}(F)$ для модуляторов, укомплектованных СВЧ-разъемами, имеющими рабочую полосу частот выше 40 ГГц. Пример неточной установки переходных плат иллюстрирует рис. 4с (наблюдается волнообразность). На рис. 4d пример точной установки переходных плат – волнообразность сглажена, и линия имеет практически ровный вид. Наличие в районе частоты 36 ГГц (см. рис. 4с, d) узкого мини-

Note that the $S_{21}(F)$ dependence in the 15–20 GHz interval has a “wavy” character (Fig. 4a, c). Comparing it with the dependence $S_{11}(F)$, we can see that the maxima of the reflection of the power of the modulating microwave signal coincide with the minima of the transmission coefficient. This suggests that there are multiple reflections in the microwave path of the modulator. They can be associated with suboptimal configuration and insufficiently accurate installation of microwave adapter cards in the modulator case. A noticeable drop in the frequency dependence of the transmission coefficient $S_{21}(F)$, starting from a frequency of 30 GHz, is due to the use of a microwave connector, for which 30 GHz is the limiting frequency according to the technical description.

Fig. 4c, d shows the dependences $S_{21}(F)$ for modulators equipped with microwave connectors having an operating frequency band above 40 GHz. An example of inaccurate installation of riser cards is illustrated in Fig. 4c (undulating is observed). Fig. 4d shows an example of the exact installation of risers – the waviness is smoothed,

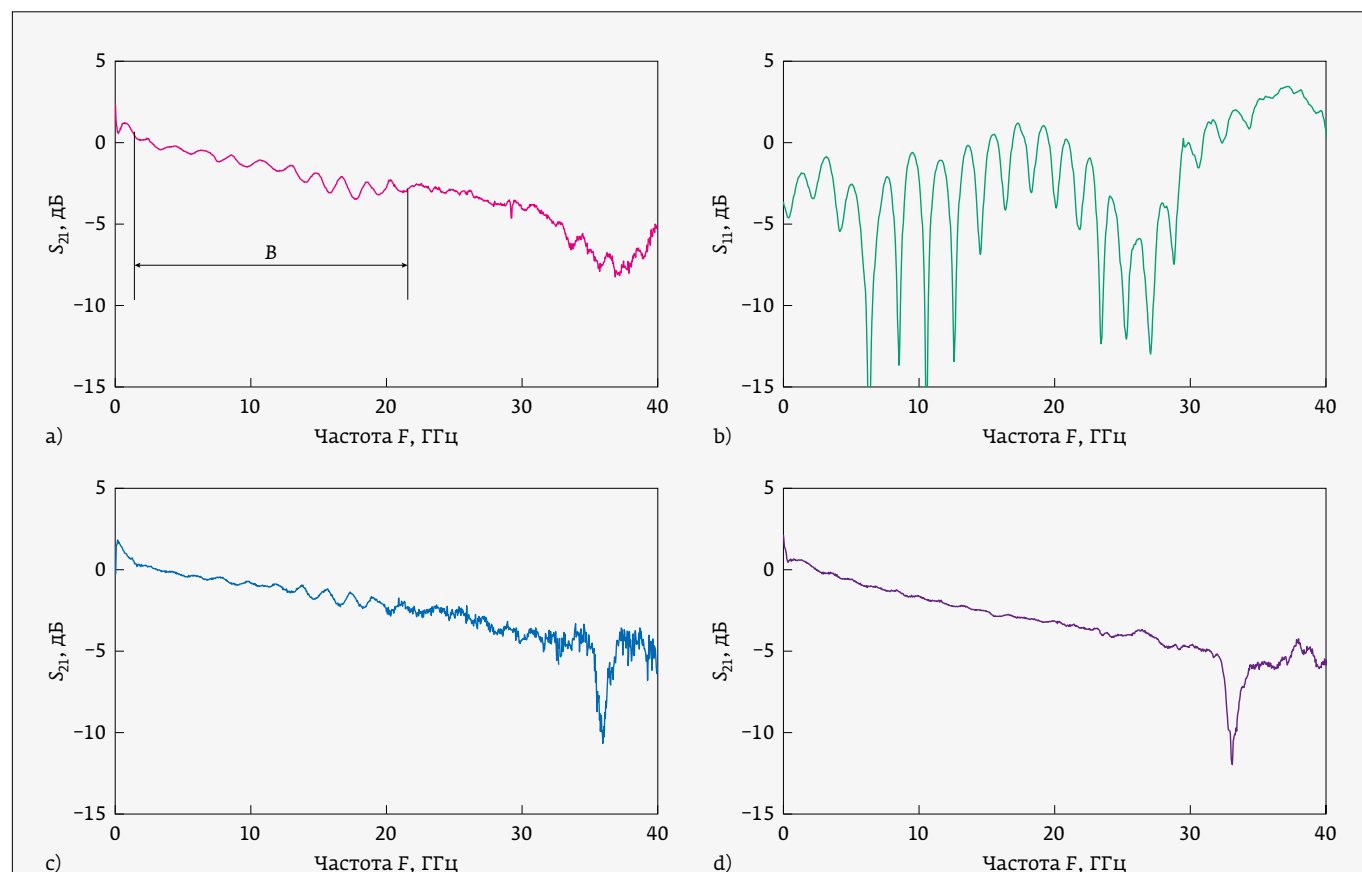


Рис. 4. Примеры зависимостей параметров S_{21} и S_{11} различных модуляторов от частоты F входного сигнала (B – рабочая полоса частот)

Fig. 4. Examples of dependences of parameters S_{21} and S_{11} of various modulators on the frequency F of the input signal (B is the operating frequency band)

мума связано с резонансными явлениями, когда в пластину ниобата лития может проникать часть входного СВЧ-излучения.

Значение коэффициента передачи G [дБ] при фиксированной мощности лазерного источника напрямую связано с полуволновым напряжением [9]:

$$G = -22,1 + 20 \log \left(\frac{I_{dc}}{V_p} \right),$$

где I_{dc} [мА] – постоянная составляющая тока на выходе калиброванного фотоприемника, V_p [В] – полуволновое напряжение. Сделанная из спектральной зависимости оценка полуволнового напряжения 5,4 В согласуется с результатами прямых измерений на частоте 1 кГц.

Поскольку модуляторы предназначены для использования в системах КРК на боковых частотах, помимо стандартных измерений полосы частот и полуволнового напряжения, были проведены измерения оптических спектров на выходе модуляторов при модуляции синусоидальным СВЧ-сигналом. Для измерений использовался оптический анализатор спектра APEX AP 2060 (рис. 3б). На рис. 5 представлены оптические спектры несущей после одночастотного полупроводникового лазера и спектры после амплитудного и фазового модуляторов. На оптическом спектре после АМ в квадратурной рабочей точке видны две боковые гармоники, соответствующие модуляции амплитуды оптического сигнала. Появление высших гармоник с существенно более низкими амплитудами

and the line looks almost even. The presence of a narrow minimum in the 36 GHz frequency region (see Fig. 4c, d) is associated with resonance phenomena, when a part of the input microwave radiation can penetrate into the lithium niobate plate.

The value of the transmission coefficient G [dB] at a fixed power of the laser source is directly related to the half-wave voltage [9]:

$$G = -22,1 + 20 \log \left(\frac{I_{dc}}{V_p} \right),$$

where I_{dc} [mA] is the constant component of the current at the output of the calibrated photodetector, V_p [V] is the half-wave voltage. The estimated 5.4 V half-wave voltage from the spectral dependence is consistent with the results of direct measurements at a frequency of 1 kHz.

Since the modulators are intended for use in QKD systems at side frequencies, in addition to standard measurements of the frequency band and half-wave voltage, measurements of the optical spectra at the output of the modulators were carried out with modulation with a sinusoidal microwave signal. An APEX AR2060 optical spectrum analyzer was used for measurements (Fig. 3b). Fig. 5 shows the optical spectra of the carrier after a single-frequency semiconductor laser and the spectra after the amplitude and phase modulators. In the optical spectrum after AM, at the quadrature operating point, two side harmonics are visible, corresponding to the modulation of the optical signal amplitude. The appearance of higher harmonics with significantly lower amplitudes is associated with nonlinear distortions. The optical spectrum at the output of the phase

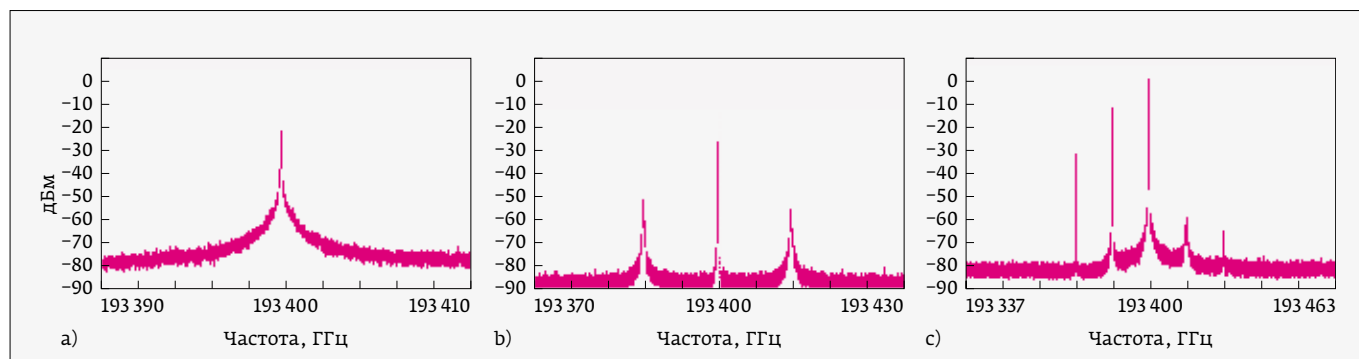


Рис. 5. Результаты измерения оптических спектров: а) оптическая несущая на выходе полупроводникового лазера ($\lambda_0 = 1552$ нм, $P_0 = 8$ мВт); б) спектр оптического сигнала после амплитудного модулятора в квадратурной рабочей точке ($F = 12$ ГГц, $P_F = 15$ дБм); в) спектр оптического сигнала после фазового модулятора ($F = 12$ ГГц, $P_F = 15$ дБм)

Fig. 5. Results of measuring optical spectra: а) optical carrier at the output of a semiconductor laser ($\lambda_0 = 1552$ nm, $P_0 = 8$ mW); б) spectrum of the optical signal after the amplitude modulator at the quadrature operating point ($F = 12$ GHz, $P_F = 15$ dBm); в) spectrum of the optical signal after the phase modulator ($F = 12$ GHz, $P_F = 15$ dBm)

связано с нелинейными искажениями. Оптический спектр на выходе фазового модулятора более богатый и содержит полный набор высших гармоник.

Из измерений оптического спектра на выходе интегрально-оптических модуляторов при разной амплитуде модулирующего сигнала, изменяющейся в диапазоне от -40 дБм до 25 дБм, были построены зависимости отношения сигнал/шум для разных частотных гармоник модулирующего сигнала (рис. 6).

Для первой гармоники модулирующего сигнала соотношение $(S/N)_{MAX}$ составляет более 60 дБ, определяемой главным образом временем усреднения оптического анализатора спектра, при мощности модулирующего сигнала 25 дБм. Аналогичные измерения были проведены для трех частот модулирующего сигнала $F=4,8; 7,8$ и $12,0$ ГГц. Необходимо отметить, что в пределах точности этих измерений величина отношения $(S/N)_{MAX}$ для всех трех значений не отличалась и составляла ≈ 60 дБ (рис. 7). В связи с особенностями технических характеристик СВЧ-генератора измерения на частотах выше 12 ГГц не производили. Тем не менее, используя измеренные частотные зависимости коэффициента передачи $S_{21}(F)$, можно оценить, что величина (S/N) для первой гармоники составляет не менее 57 дБ для $F=20$ ГГц. Это свидетельствует о возможности эффективного использования модуляторов в системах КРК на боковых частотах во всем доступном рабочем частотном диапазоне 20 ГГц.

modulator is richer and contains a full set of higher harmonics.

From measurements of the optical spectrum at the output of integrated-optical modulators at different amplitudes of the modulating signal, varying in the range from -40 dBm to 25 dBm, the dependences of the signal-to-noise ratio were constructed for different frequency harmonics of the modulating signal (Fig. 6).

For the first harmonic of the baseband signal, the $(S/N)_{MAX}$ ratio is greater than 60 dB, mainly determined by the averaging time of the optical spectrum analyzer, at a baseband power of 25 dBm. Similar measurements were carried out for three frequencies of the modulating signal $F = 4.8; 7.8$ and 12.0 GHz. It should be noted that, within the accuracy of these measurements, the value of the $(S/N)_{MAX}$ ratio for all three values did not differ and amounted to ≈ 60 dB (Fig. 7). Due to the peculiarities of the technical characteristics of the microwave generator, measurements at frequencies above 12 GHz were not performed. Nevertheless, using the measured frequency dependences of the gain $S_{21}(F)$, it can be estimated that the value (S/N) for the first harmonic is at least 57 dB for $F=20$ GHz. This indicates the possibility of effective use of modulators in QKD systems at side frequencies in the entire available operating frequency range of 20 GHz.

CONCLUSION

The developed and manufactured integrated optical amplitude and phase microwave modulators have a working frequency bandwidth of at least 20 GHz (according to the criterion of 3 dB decay). The 5.4 V half-wave voltage provides efficient sideband generation. The achieved

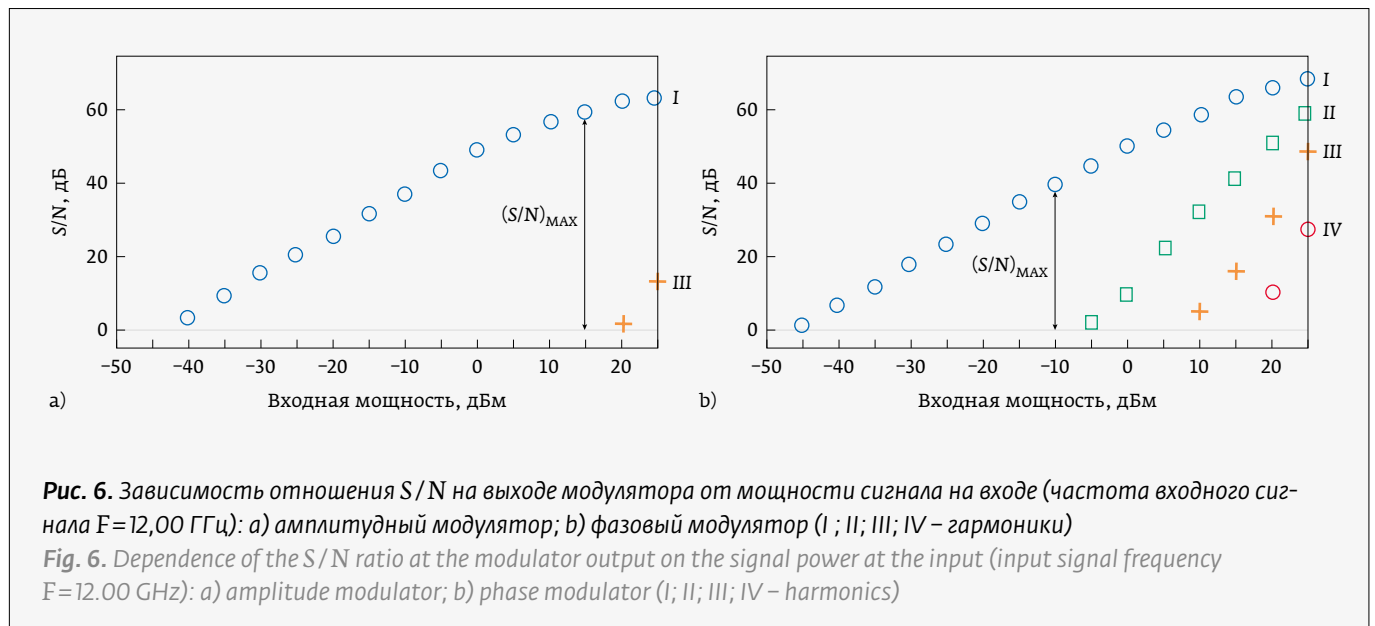


Рис. 6. Зависимость отношения S/N на выходе модулятора от мощности сигнала на входе (частота входного сигнала $F=12,00$ ГГц): а) амплитудный модулятор; б) фазовый модулятор (I; II; III; IV – гармоники)

Fig. 6. Dependence of the S/N ratio at the modulator output on the signal power at the input (input signal frequency $F=12.00$ GHz): а) amplitude modulator; б) phase modulator (I; II; III; IV – harmonics)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные и изготовленные интегрально-оптические амплитудные и фазовые СВЧ-модуляторы обладают шириной полосы рабочих частот не менее 20 ГГц (по критерию спада на 3 дБ). Полуволновое напряжение 5,4 В обеспечивает эффективную генерацию боковых частот. Достигнутые параметры в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к модуляторам как для «обычных» систем оптической связи с амплитудной и фазовой модуляцией, так и для систем связи, использующих принцип квантовой рассылки ключа на боковых частотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gleim A. V., Chistyakov V. V., Bannik O. I., et al. Sideband quantum communication at 1 Mbit / s on a metropolitan area network. *Journal of Optical Technology*. 2017; 84(6): 362–367. DOI: 10.1364 / JOT.84.000362.
2. URL: https://digital.ac.gov.ru/news/4761/https://drive.google.com/file/d/1nDQLGTIfnW7suHANdXQyms-kxbc_hl3P/view?usp=s
3. Mahapatra A., Murphy E. J. Electrooptic Modulators. *Optical Fiber Telecommunications IV A: Components*, edited by I. P. Caminon and T. Li, Academic Press, San-Diego, USA. 2002; 258–294. DOI: 10.1016/B978-012395172-4/50006-1.
4. Chen A., Murphy E., Raton B. (ed.). *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*. – CRC Press. 2011. 568 p. ISBN 978-1-4398-2506-8.
5. Петров В. М., Шамрай А. В. Интерференция и дифракция для информационной фотоники. – С.-Пб.: Лань. 2019. 460 с. ISBN 978-5-8114-3567-8.
6. Ильичев И. В., Тогуз Н. В., Шамрай А. В. Плазмон-поляритонный поляризатор на поверхности канальных одноמודовых волноводов в ниобате лития. – *Письма в ЖТФ*. 2009; 35(17): 97–103.
7. Лебедев В. В., Ильичев И. В., Агрузов П. М., Шамрай А. В. Влияние материала токоведущих частей электродов на характеристики интегрально-оптических СВЧ-модуляторов. – *Письма в ЖТФ*. 2014; 40(17): 39–46.
8. Патент РФ № 187990 U1. Оптический модулятор / Лебедев В. В., Ильичев И. В., Агрузов П. М., Тронева А. В., Шамрай А. В.
9. Урик В. Дж., Мак-Кини Дж. Дб., Вильямс К. Дж. *Основы микроволновой фотоники* / пер. с англ. – М.: Техносфера, 2016. 375 с. ISBN 978-5-94836-445-2.

ОБ АВТОРАХ:

Петров Виктор Михайлович, д. ф.-м. н. (радиофизика), д. ф.-м. н. (оптика), vmpetrov@itmo.ru, главный научный сотрудник, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000 0002 8523 0336

Герасименко Наталья Дмитриевна, инженер, Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000 0002 6039 9485

Герасименко Владислав Сергеевич, инженер, 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., снс, лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000 0001 7803 0630

Агрузов Пётр Михайлович, мнс, лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: будет дополнен

Лебедев Владимир Владимирович, к. ф.-м. н., мнс, лаб. квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000 0003 0292 8673

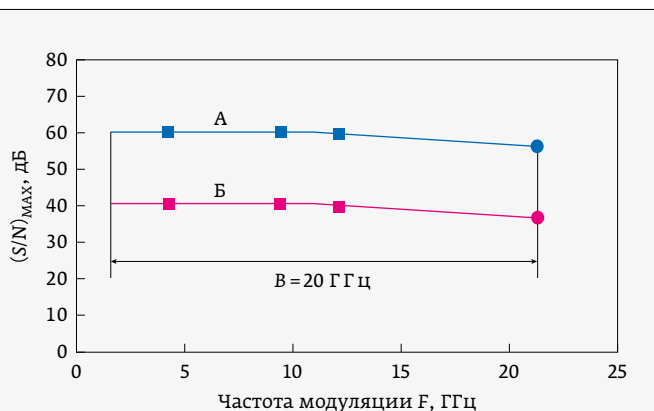


Рис. 7. Зависимость отношения $(S/N)_{MAX}$ для первой гармоники модулирующего сигнала от частоты модуляции F (мощность модулирующего сигнала 25 дБм): А – амплитудный модулятор, Б – фазовый модулятор (обозначения: квадратики – измеренные значения; кружки – значения, полученные путем аппроксимации зависимости $S_{21}(F)$)

Fig. 7. Dependence of the $(S/N)_{MAX}$ ratio for the first harmonic of the modulating signal on the modulation frequency F (the power of the modulating signal is 25 dBm): А – amplitude modulator, В – phase modulator (symbols: squares – measured values; circles – values obtained by approximation of the dependence $S_{21}(F)$)

parameters fully meet the requirements for modulators both for “conventional” optical communication systems with amplitude and phase modulation, and for communication systems using the principle of quantum key distribution at side frequencies.

REFERENCES

1. Gleim A. V., Chistyakov V. V., Bannik O. I., et al. Sideband quantum communication at 1 Mbit / s on a metropolitan area network. *Journal of Optical Technology*. 2017; 84(6): 362–367. DOI: 10.1364 / JOT.84.000362.
2. URL: https://digital.ac.gov.ru/news/4761/https://drive.google.com/file/d/1nDQLGTIfnW7suHANdXQyms-kxbc_hl3P/view?usp=s
3. Mahapatra A., Murphy E. J. Electrooptic Modulators. *Optical Fiber Telecommunications IV A: Components*, edited by I. P. Caminon and T. Li, Academic Press, San-Diego, USA. 2002; 258–294. DOI: 10.1016/B978-012395172-4/50006-1.
4. Chen A., Murphy E., Raton B. (ed.). *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*. – CRC Press. 2011. 568 p. ISBN 978-1-4398-2506-8.
5. Petrov V. M., Shamrai A. V. Interferenciya i difrakciya dlya informacionnoj fotoniki. – S.-Pb.: Lan'. 2019. 460 pp. ISBN 978-5-8114-3567-8.
6. Il'ichev I. V., Toguzov N. V., Shamrai A. V. Plazmon-polyaritonnyj polarizator na poverhnosti kanal'nyh odnomodovyh volnovodov v niobate litiya. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics Letters)*. 2009; 35(17): 97–103.
7. Lebedev V. V., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Shamrai A. V. Vliyanie materiala tokovedushchih chastej elektrodov na karakteristiki integral'no-opticheskikh Microwave-modulyatorov. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki (Technical Physics Letters)*. 2014; 40(17): 39–46.
8. Patent RU187990U1 *Optical modulator* / Lebedev V. V., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Troneva A. V., Shamrai A. V.
9. Urick Jr., Vincent J. et al. *Fundamentals of microwave photonics* [New York]: Wiley, cop. 2015. – М.: Technosphaera. 2016. 375 pp. ISBN 978-5-94836-445-2.



ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

Личный вклад Петрова В. М.: формулирование технических требований к модуляторам, исходя из решаемых ими задач в системах квантовых коммуникаций. Постановка задачи. Обработка результатов, подготовка рукописи статьи.

Личный вклад Шамрая А. В.: общее научное руководство разработкой и созданием модуляторов. Обсуждение результатов работы, формулирование результатов работы, обсуждение и выдача рекомендаций по рукописи статьи.

Личный вклад Ильичёва И. В.: разработка и практическая реализация технологии изготовления волноводов и электродов модуляторов. Осуществление общего технологического контроля.

Личный вклад Агрузова П. М.: разработка и практическая реализация технологии высококачественного соединения оптического волокна с оптическим волноводом и разработка методики тестирования. Проведение предварительных расчётов оптических соединений, их оптимизация, и проведение измерений оптических элементов модуляторов.

Личный вклад Лебедева В. В.: разработка и практическая реализация технологии ввода СВЧ-излучения в тракт электродов бегущей волны. Предварительные расчёты и измерения СВЧ-элементов модуляторов. Участие в обсуждении результатов, формулировка результатов работы

Личный вклад Герасименко Н. В.: практическое создание стендов для экспериментальных исследований модуляторов, разработка программы и методик испытаний. Участие в обсуждении результатов, формулировка результатов работы.

Личный вклад Герасименко В. С.: проведение измерений, обработка и систематизация полученных экспериментальных данных. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими. Участие в обсуждении результатов, формулировка результатов работы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

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

Агрузов Петр Михайлович, junior researcher, lab. of Quantum Electronics Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe, St. Petersburg, Russia.

ORCID:

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.

ЭССЕНТОПТИКС  ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



185 – 5200 nm

УНИКАЛЬНО ШИРОКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ
ДИАПАЗОН В ОДНОМ ПРИБОРЕ

—
WORLD-RECORD WAVELENGTH RANGE
IN ONE INSTRUMENT

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com