

Радиофотоника

УДК 537.87

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56>

Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну

И. Ю. Таценко¹, Т. К. Легкова¹, А. В. Иванов², А. Б. Устинов¹✉

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

² АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха", Москва, Россия

✉ ustinov-rus@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время большой научный и практический интерес вызывает передача радиочастотного сигнала по оптической линии. Такую линию передачи можно также использовать при создании многих радиофотонных устройств. С ростом мощности используемого лазера снижаются потери СВЧ-сигнала в линии передачи. Однако массово выпускаемые фотодетекторы выдерживают мощность в несколько десятков милливатт. Использование фотодетектора с высоким фототоком позволит улучшить характеристики оптоволоконных линий передачи, в частности, снизить потери при передаче аналогового или цифрового радиочастотного сигнала.

Цель. Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком в системе передачи сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну, а также исследование зависимости потерь СВЧ-сигнала от значения мощности оптического излучения в такой системе.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены на сконструированных экспериментальных схемах для исследования характеристик фотодетектора при модулированном и немодулированном оптическом излучении. Теоретические исследования выполнены математическим моделированием передаточных характеристик оптического тракта при различных мощностях входного СВЧ-сигнала.

Результаты. Найден зависимости фототока и фотонапряжения фотодетектора от мощности излучения лазера. Представлены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) оптической линии передачи, измеренные при различных мощностях оптического излучения. Описан алгоритм получения частотной зависимости чувствительности фотодетектора в диапазоне частот 0...12 ГГц. Приведены результаты теоретического расчета АЧХ линии передачи в указанном диапазоне частот. Получена приближенная частотная зависимость чувствительности фотодетектора.

Заключение. За счет использования фотодетектора с высоким значением фототока и повышения мощности лазера до 100 мВт потери СВЧ-сигнала в оптической линии передачи составили около 10 дБ. Показано, что для улучшения передаточных характеристик оптической линии передачи необходимо использовать широкополосный электрооптический модулятор.

Ключевые слова: радиофотоника, фотодетектор, радиофотонная линия передачи

Для цитирования: Исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну / И. Ю. Таценко, Т. К. Легкова, А. В. Иванов, А. Б. Устинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 4. С. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56

Благодарности. Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № 0788-2020-0005).

Авторы выражают благодарность В. В. Щербакову (АО "Центр ВОСПИ") за предоставленное оптическое волокно для проведения исследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.05.2020; принята к публикации после рецензирования 10.07.2020; опубликована онлайн 29.09.2020



Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber

Ivan Yu. Tatsenko¹, Tat'yana K. Legkova¹, Andrey V. Ivanov², Alexey B. Ustinov¹✉

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company, Moscow, Russia

✉ ustinov-rus@mail.ru

Abstract.

Introduction. At present, an optical transmission of a microwave signal is of great scientific and practical interest. Moreover, this transmission line can also be used to create microwave photonic devices. Microwave signal losses decrease with an increase of laser power. Commercial photodetectors withstand radiation with a power of several tens of milliwatts. Using a photodetector with a high photocurrent can improve characteristics of photonic transmission lines; in particular, it can reduce microwave signal losses.

Aim. Investigation of characteristics of a photodetector with a high photocurrent when transmitting microwave radio signals through optical fiber. Research of microwave signal losses as a function of optical power.

Materials and Methods. Experimental studies were carried out on created experimental schemes for studying the characteristics of the photodetector with modulated and unmodulated optical radiation. Theoretical studies were carried out by mathematical modeling of optical path transfer characteristics from the laser power at various powers of an input microwave signal.

Results. The dependencies of photocurrent and photovoltage of the photodetector versus laser power were obtained. The experimental amplitude-frequency characteristics of the photonic transmission line were measured at different optical powers. A frequency dependence of the photodetector sensitivity in the range of 0...12 GHz was obtained. Modeling of amplitude-frequency characteristics of the optical path in the range of 0...12 GHz was performed. An approximate frequency dependence of the photodetector sensitivity was obtained.

Conclusion. Due to the use of a photodetector with a high photocurrent value and with increasing laser power, microwave losses were reduced to about 10 dB. It was shown that for improving the transmission characteristics of an optical transmission line, it is necessary to use a broadband electro-optical modulator.

Keywords: microwave photonics, photodetector, microwave photonic transmission line

For citation: Tatsenko I. Yu., Legkova T. K., Ivanov A. V., Ustinov A. B. Investigation of the Characteristics of a Photodetector with a High Photocurrent when Transmitting Microwave Radio Signals Through an Optical Fiber. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56

Acknowledgments. This work was supported in part by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project "Goszadanie", grant № 0788-2020-0005).

The authors are grateful to I. A. Tolkachev for performing calculations in the TCAD Synopsys simulation package.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 28.05.2020; accepted 10.07.2020; published online 23.09.2020

Введение. В последние годы радиофотоника стала актуальным направлением развития науки и техники. В частности, большой научный и практический интерес представляет разработка и исследование линий передачи радиосигнала по оптическому волокну [1–3]. Помимо непосредственной передачи радиосигнала такие линии передачи можно использовать в устройствах генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов [4–16],

сканирующих приемниках [17, 18], для оптического усиления [19, 20] и др. [21–30].

Оптоволоконная линия передачи (ОВЛП) радиосигнала состоит из лазера, электрооптического модулятора, оптоволоконной линии задержки и фотодетектора. За счет использования одномодового оптоволокна достигаются низкие потери оптического излучения с длиной волны порядка 1550 нм. Использование быстродействующих

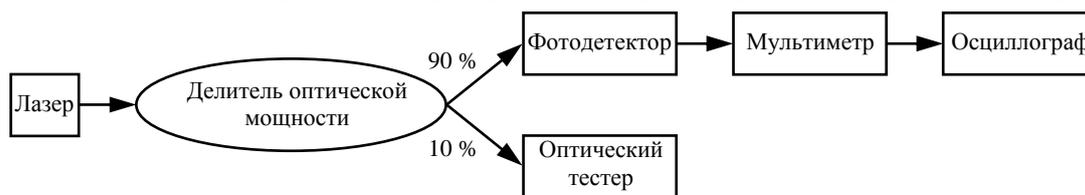


Рис. 1. Схема исследования характеристик фотодетектора при немодулированном излучении

Fig. 1. Scheme for measurements of the photodetector characteristics with continuous laser intensity

щих фотодетекторов и электрооптических модуляторов позволяет реализовать радиофотонные системы в диапазоне до десятков гигагерц.

Известно, что потери СВЧ-сигнала в ОВЛП уменьшаются с ростом мощности лазерного излучения [1–3]. Типичные фотодетекторы, выпускаемые промышленностью, выдерживают на входе оптическое излучение в несколько десятков милливатт, что соответствует потерям порядка 30 дБ. Для уменьшения потерь необходимо использовать фотодетекторы с высоким фототоком, выдерживающие повышенную мощность оптического излучения.

Целью работы, описываемой в настоящей статье, явилось исследование характеристик фотодетектора с высоким фототоком при передаче сверхвысокочастотного радиосигнала по оптоволокну, а также исследование зависимости потерь СВЧ-сигнала от мощности оптического излучения. Фотодетектор "Пром-17" был разработан и изготовлен в АО "НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха". В эксперименте СВЧ-выход фотодетектора был нагружен на сопротивление 50 Ом, равное его волновому сопротивлению. Верхняя граничная частота составляла 12 ГГц.

Экспериментальные характеристики фотодетектора при немодулированном излучении. Для экспериментального исследования характеристик фотодетектора в зависимости от мощности лазера при немодулированном излучении была со-

брана схема, представленная на рис. 1. Схема состоит из лазера с номинальной мощностью 100 мВт на излучении с длиной волны 1550 нм, делителя оптической мощности, фотодетектора, мультиметра, осциллографа и оптического тестера.

Принцип работы схемы заключается в следующем. Излучение с лазера подается на оптический делитель. Примерно 90 % мощности поступает на фотодетектор, а около 10 % – на оптический тестер. С помощью мультиметра и осциллографа измеряются фототок и фотонапряжение соответственно.

Мощность оптического излучения контролируется оптическим тестером. Для этого сначала калибруется оптический делитель и с высокой точностью определяется коэффициент деления. Затем мощность, измеренная оптическим тестером, пересчитывается в мощность, поступающую на фотодетектор.

На рис. 2 представлены зависимости фототока $I_{фд}$ и фотонапряжения $U_{фд}$ фотодетектора от мощности лазера. На полученных зависимостях можно выделить линейный участок и область насыщения. При падающей мощности до 60 мВт происходит линейный рост фототока и фотонапряжения. Исходя из зависимости фототока определена чувствительность фотодетектора на линейном участке при непрерывном оптическом излучении, составившая 0.8 А/Вт. При дальнейшем увеличении оптической мощности наблюдается переход в насыщение, который обусловлен возникно-

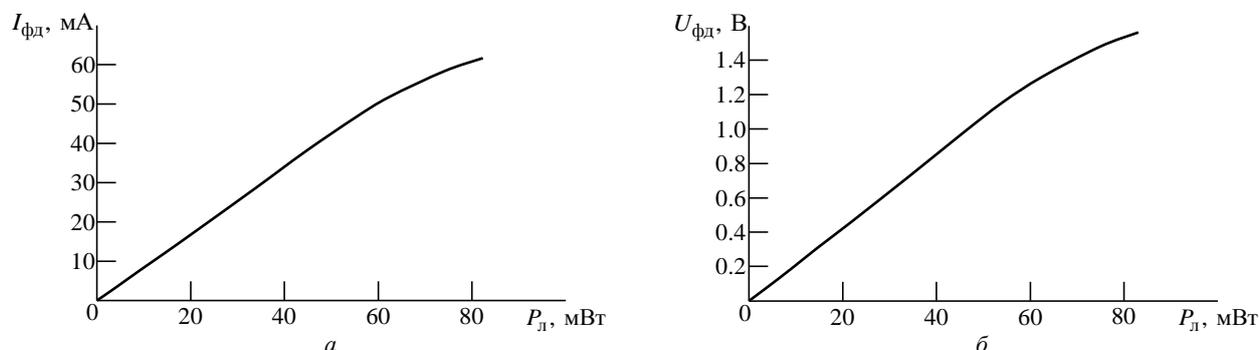


Рис. 2. Зависимость фототока (а) и фотонапряжения (б) фотодетектора от мощности лазера

Fig. 2. Photocurrent (a) and photovoltage (b) vs laser power

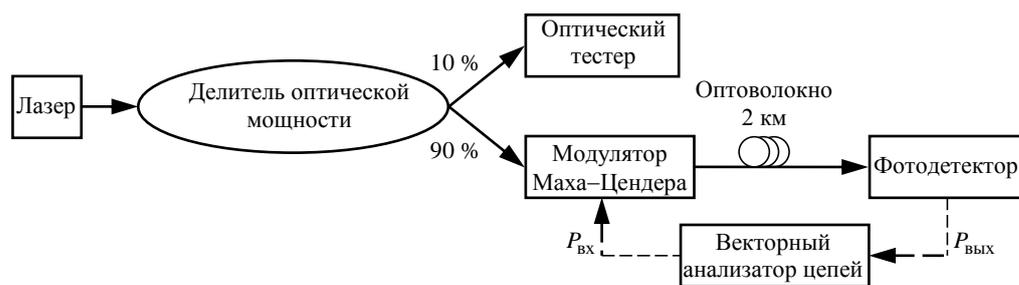


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик фотодетектора при синусоидальной модуляции оптического излучения, а также для измерения АЧХ линии передачи

Fig. 3. Scheme for measurement of the characteristics of a photodetector under sinusoidal modulation of optical radiation, as well as for measurement of the amplitude-frequency characteristic of the transmission line

вением пространственного заряда в области поглощения излучения. С ростом интенсивности оптического излучения концентрация электронов и дырок становится больше концентрации примеси в поглощающем слое. Носители заряда распределяются неравномерно из-за различий в дрейфовой скорости, искажая распределение электрического поля и приводя к насыщению [1].

Экспериментальное исследование характеристик фотодетектора при модулированном оптическом сигнале. На следующем этапе проведено исследование амплитудно-частотных характеристик ОВЛП при модуляции оптической несущей СВЧ-радиосигналом. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Установка состоит из лазера с номинальной мощностью 100 мВт на длине волны излучения 1550 нм, делителя оптической мощности, электрооптического модулятора Маха-Цендера, оптоволоконной линии задержки длиной 2 км, фотодетектора, векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA40 и оптического тестера. Эксперименты проводились с модулятором Маха-Цендера, имеющим полуволновое напряжение $U_{\pi} = 1.6$ В, верхнюю граничную частоту 30 ГГц и оптические потери в максимуме коэффициента передачи 4.5 дБ.

Установка работает следующим образом. Излучение лазера поступает на делитель мощности, который ответвляет примерно 90 % излучения на модулятор Маха-Цендера. Оптическое излучение, модулированное СВЧ-сигналом, проходит через оптоволоконную линию задержки и подается на фотодетектор, на выходе которого формируется электрический СВЧ-сигнал, пропорциональный интенсивности оптического излучения. С помощью векторного анализатора цепей измеряется коэффициент передачи СВЧ-сигнала S_{21} от управляющего входа модулятора до выхода фотодетектора. Рабочая точка модулятора находится в квад-

ратуре, так как это позволяет передавать радиосигнал с минимальными искажениями.

Результаты. На рис. 4 маркерами представлены экспериментальные АЧХ линии передачи, полученные при различных мощностях лазера. Из графиков видно, что с ростом частоты СВЧ-сигнала в диапазоне 0...12 ГГц коэффициент его передачи плавно уменьшается. Такое поведение может быть обусловлено как снижением чувствительности фотодетектора, так и уменьшением коэффициента передачи модулятора. Измерения также показали, что при увеличении мощности излучения лазера передаточная характеристика смещается вверх, так как мощность СВЧ-сигнала на выходе фотодетектора пропорциональна интенсивности оптического излучения. Резкий спад АЧХ выше частоты 12 ГГц обусловлен верхней граничной частотой фотодетектора.

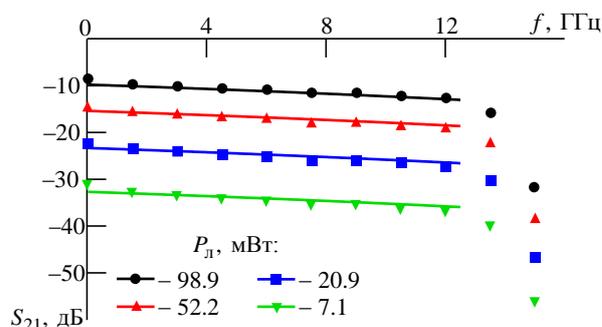


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики линии передачи радиосигнала по оптоволокну при различных мощностях излучения лазера (маркеры – эксперимент, кривые – теория)

Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of the transmission line of a radio signal over an optical fiber for various laser radiation power (markers – experiment, curves – theory)

Обсуждение. На рис. 5 представлена передаточная характеристика модулятора, приведенная в его паспорте предприятием-изготовителем. Из этой характеристики видно, что на частотах до 12 ГГц ко-

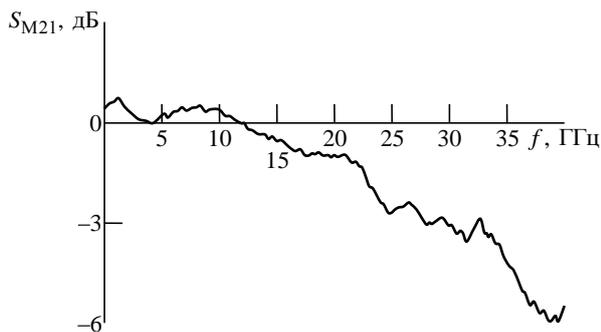


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента передачи модулятора Маха–Цендера, приведенная к 0 дБ

Fig. 5. The transmission characteristic of the Mach–Zehnder modulator, reduced to 0 dB, vs frequency

эффицент передачи отклоняется от среднего значения 0.3 дБ в пределах ± 0.3 дБ. Следовательно, в диапазоне частот до 12 ГГц спад коэффициента передачи ОВЛП обусловлен только частотной зависимостью чувствительности фотодетектора.

Для определения зависимости чувствительности фотодетектора от частоты были рассчитаны АЧХ линии передачи. Выходная мощность фотодетектора рассчитывалась по формуле [3]

$$P_{\text{вых}} = R \left[P_{\text{л}} S_{\text{фд}} J_1 \left(\frac{\pi U_{\text{м.с}}}{U_{\pi}} \right) \sin \left(\frac{\pi U_{\text{см}}}{U_{\pi}} \right) \right]^2,$$

где $R = 50$ Ом – сопротивление нагрузки фотодетектора; $P_{\text{л}}$ – мощность лазера; $S_{\text{фд}} = 0.8$ А/Вт – чувствительность фотодетектора; $J_1(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка; $U_{\text{м.с}}$ – напряжение модулирующего сигнала; $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения рабочей точки. Коэффициент передачи определялся как отношение выходной СВЧ-мощности фотодетектора к СВЧ-мощности, поданной на управляющий вход модулятора

Маха–Цендера. Зависимость чувствительности фотодетектора от частоты была найдена сопоставлением рассчитанных и экспериментальных АЧХ.

Сопоставление показало, что с увеличением частоты от 0 до 12 ГГц чувствительность фотодетектора снижается от 0.8 до 0.56 А/Вт. Учитывая, что коэффициент передачи оптического тракта уменьшается линейно, можно получить приближенную частотную зависимость чувствительности фотодетектора в данном диапазоне. Зная, что при нулевой частоте чувствительность фотодетектора равна 0.8 А/Вт, а при частоте 12 ГГц она равна 0.56 А/Вт, нетрудно получить следующее линейное выражение для частотной зависимости чувствительности фотодетектора:

$$S(f) = 0.8 - 0.2 \cdot 10^{-10} f. \quad (1)$$

Рассчитанные зависимости АЧХ линии передачи представлены кривыми на рис. 4. Сопоставление теории и эксперимента показывает, что выражение (1) хорошо описывает чувствительность фотодетектора в диапазоне частот 0...12 ГГц.

Заключение и выводы. В настоящей статье представлены результаты исследования характеристики фотодетектора при непрерывном и модулированном оптическом излучении, а также АЧХ оптоволоконной линии передачи радиочастотного сигнала, использующего такой фотодетектор. Исходя из экспериментальных данных найдена теоретическая зависимость чувствительности фотодетектора от частоты. Показано (рис. 4), что повышение мощности лазера до 100 мВт позволяет уменьшить потери СВЧ-сигнала в линии передачи примерно до 10 дБ. Предложен метод определения частотной зависимости чувствительности фотодетектора.

Авторский вклад

Таценко Иван Юрьевич – проведение экспериментальных измерений и математических расчетов.
Легкова Татьяна Константиновна – проведение экспериментальных измерений.
Иванов Андрей Викторович – разработка и изготовление фотодетектора.
Устинов Алексей Борисович – постановка задачи и руководство научными исследованиями.
 Все авторы участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Author's contribution

Ivan Yu. Tatsenko, carrying out measurements and calculations.
Tat'yana K. Legkova, carrying out measurements.
Andrey V. Ivanov, development and manufacture of photodetector.
Alexey B. Ustinov, formulation of the problem and management of the work.
 All authors participated in the discussion of the results and preparation of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Signal-to-Noise Performance of Two Analog Photonic Links using Different Noise Reduction Techniques / E. I. Ackerman, G. E. Betts, W. K. Burns, J. C. Campbell, C. H. Cox, N. Duan, J. L. Prince, M. D. Regan, H. V. Rousell // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii, 2007. P. 51–54.
2. Сверхширокополосный многофункциональный радиопотонный приемный тракт для аналоговой обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А. А. Белоусов, Ю. Н. Вольхин, А. В. Гамиловская, А. А. Дубровская, Е. В. Тихонов // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. ст. IV Всерос. конф., Санкт-Петербург, 1–4 июня 2015 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. Т. 1. С. 337–341.
3. Повышение коэффициента передачи радиочастотной волоконно-оптической линии за счет управления рабочей точкой внешнего модулятора / А. Н. Петров, А. В. Тронеv, В. В. Лебедев, И. В. Ильичев, Е. Н. Величко, А. В. Шамрай // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 5. С. 131–136. doi: 10.1134/S1063784215050217
4. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic Microwave Oscillator // J. of the Optical Society of America B. 1996. Vol. 13, № 8. P. 1725–1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725
5. Tunable RF-band Optoelectronic Oscillator and Optoelectronic Computer-Added Design Model for its Simulation / M. E. Belkin, A. V. Loparev, Y. Semenova, G. Farrell, A. S. Sigov // Microwave and Optical Technology Lett. 2011. Vol. 53, № 11. P. 2474–2477. doi: 10.1002/mop.26304
6. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable Frequency-Quadrupling Dual-Loop Optoelectronic Oscillator // IEEE Photonics Technology Lett. 2012. Vol. 24. P. 194–196. doi: 10.1109/LPT.2011.2176332
7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Electronically Tunable Spin-Wave Optoelectronic Microwave Oscillator // Tech. Phys. 2015. Vol. 60, № 9. P. 1392–1396. doi: 10.1134/S1063784215090224
8. Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Theory of a Tunable Spin-Wave Optoelectronic Microwave Oscillator // Technical Physics. 2015. Vol. 60, № 9. P. 1397–1401. doi: 10.1134/S1063784215090145
9. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator // IEEE Magnetics Lett. 2015. Vol. 6. P. 1–4. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238
10. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. A Microwave Photonic Generator of Chaotic and Noise Signals // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42, № 4. P. 403–406. doi: 10.1134/S1063785016040283
11. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. Dynamic Modes of Microwave Signal Autogeneration in a Radio Photonic Ring Generator // Technical Physics. 2017. Vol. 62, № 2. P. 287–293. doi: 10.1134/S1063784217020153
12. Self-Generation of Chaotic Microwave Signal in Spin Wave Optoelectronic Generator / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, A. V. Drozdovskii, B. A. Kalinikos // Phys. Solid State. 2018. Vol. 60, № 11. P. 2127–2131. doi: 10.1134/S106378341811032X
13. A Tunable Spin Wave Photonic Generator with Improved Phase Noise Characteristics / A. B. Ustinov, A. V. Kondrashov, A. A. Nikitin, V. V. Lebedev, A. N. Petrov, A. V. Shamrai, B. A. Kalinikos // J. of Phys.: Conf. Oct. 2019. Vol. 1326. Art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
14. A Model for Designing Ultralow Noise Single-and Dual-Loop 10-GHz Optoelectronic Oscillators / O. Lelievre, V. Crozatier, P. Berger, G. Baili, O. Llopis, D. Dolfi, P. Nouchi, F. Goldfarb, F. Bretenaker, L. Morvan, G. Pillet // J. of Lightwave Technology. 2017. Vol. 35, № 20. P. 4366–4374. doi: 10.1109/JLT.2017.2729018
15. Highly Spectrally Pure 90-GHz signal Synthesis using a Coupled Optoelectronic Oscillator / A. Ly, V. Auroux, R. Khayat-zadeh, N. Gutierrez, A. Fernandez, O. Llopis // IEEE Photonics Technology Lett. 2018. Vol. 30, № 14. P. 1313–1316. doi: 10.1109/LPT.2018.2845747
16. High-Performance Millimeter-Wave Synergetic Optoelectronic Oscillator with Regenerative Frequency-Dividing Oscillation Technique / A. Liu, Y. Yang, R. Song, J. Liu, J. Dai, Z. Tian, K. Xu // Optics express. 2019. Vol. 27, № 7. P. 9848–9856. doi: 10.1364/OE.27.009848
17. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System / P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, A. Capria, S. Pinna, E. Lazzi, C. Porzi, M. Scaffardi, A. Malacarne, V. Vercesi, E. Lazeri, F. Berizzi, A. Bogoni // Nature. 2014. Vol. 507, iss. 7492. P. 341–345. doi: 10.1038/nature13078
18. A Photonically Enabled Compact 0.5–28.5 GHz RF Scanning Receiver / D. Onori F. Scotti, F. Laghezza, M. Bartocci, A. Zaccaron, A. Tafuto, A. Albertoni, A. Bogoni, P. Ghelfi // J. of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36, № 10. P. 1831–1839. doi: 10.1109/JLT.2018.2792304
19. All-Optical RF Amplification toward Gpbs Communications and Millimeter-Waves Applications / A. L. M. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, A. Bogoni, M. Hirano, A. Cerqueira Sodr  // Microwave and Optical Technology Lett. 2017. Vol. 59, № 9. P. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704
20. Thermal and Dynamic Range Characterization of a Photonics-Based RF Amplifier / D. F. Noque, R. M. Borges, A. L. M. Muniz, A. Bogoni, Arismar Cerqueira S. Jr. // Optics Communications. 2018. Vol. 414. P. 191–194. doi: 10.1016/j.optcom.2018.01.015
21. Wideband 360° Microwave Photonic Phase Shifter based on Slow Light in Semiconductor Optical Amplifiers / W. Xue, S. Sales, J. Capmany, J. Mørk // Optics Express. 2010. Vol. 18, iss. 6. P. 6156–6163. doi: 10.1364/OE.18.006156
22. Fully Tunable 360° Microwave Photonic Phase Shifter based on a Single Semiconductor Optical Amplifier / J. Sancho, J. Lloret, I. Gasulla, S. Sales, J. Capmany // Optics Express. 2011. Vol. 19, iss. 18. P. 17421–17426. doi: 10.1364/OE.19.017421
23. Widely Tunable Microwave Photonic Notch Filter

based on Slow and Fast Light Effects / W. Xue, S. Sales, J. Mørk, J. Capmany // IEEE Photonics Technology Lett. 2009. Vol. 21, № 3. P. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468

24. Yan Y., Yao J. P. A tunable Photonic Microwave Filter with a Complex Coefficient using an Optical RF Phase Shifter // IEEE Photonics Technology Lett. 2007. Vol. 19, № 19. P. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753

25. Yi X., Huang T. X. H., Minasian R. A. Tunable and Reconfigurable Photonic Signal Processor with Programmable All-Optical Complex Coefficients // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. Vol. 58, № 11. P. 3088–3093. doi: 10.1109/TMTT.2010.2076931

26. Programmable Multi-Tap Microwave Photonic Phase Filtering via Optical Frequency Comb Shaping / M. H. Song, V. Torres-Company, R. Wu, E. Hamidi, A. M. Weiner // 2011 Intern. Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conf. Singapore, Oct. 18–21, 2011. P. 37–40. doi: 10.1109/MWP.2011.6088663

27. Zeng F., Wang J., Yao J. P. All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients based on a Phase Modulator and linearly Chirped Fiber Bragg Gratings // Optics Lett. 2005. Vol. 30, № 17. P. 2203. doi: 10.1364/OL.30.002203

28. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients based on PM-IM Conversion // IEEE Photonics Technology Lett. 2005. Vol. 17, № 10. P. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323

29. Novel Technique for Implementing Incoherent Microwave Photonic Filters with Negative Coefficients using Phase Modulation and Single Sideband Selection / J. Mora, J. Capmany, A. Loayssa, D. Pastor // IEEE Photonics Technology Lett. 2006. Vol. 18, № 18. P. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950

30. Yao J. P., Wang Q. Photonic Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients using a Polarization Modulator // IEEE Photonics Technology Lett. 2007. Vol. 19, № 9. P. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942

Информация об авторах

Таценко Иван Юрьевич – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиofотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Легкова Татьяна Константиновна – бакалавр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2019), студентка 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиofотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: legkova_tk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6351-4963>

Иванов Андрей Викторович – начальник отдела АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха". Автор более 70 научных публикаций. Сфера научных интересов – волоконно-оптические активные компоненты, оптоэлектроника, радиofотоника.

Адрес: АО "НИИ "Полюс" им. М. Ф. Стельмаха", ул. Введенского, д. 3, к. 1, Москва, 117342, Россия
E-mail: aviv58@rambler.ru

Устинов Алексей Борисович – доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах, СВЧ-электроника, радиofотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince, J., Regan M., Roussel M. H. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii. 2007, pp. 51–54.

2. Belousov A. A., Vol'khin Yu. N., Gamilovskaya A. V., Dubrovskaya A. A., Tikhonov E. V. Ultra-wideband multifunctional microwave photonic receiving path for analog processing signals decimeter, centimeter and millimeter wavelengths. Microwave electronics and microelectron-

ics conference. 2015, vol. 1, pp. 337–341. (In Russ.)

3. Petrov A. N., Tronev A. V., Lebedev V. V., Il'ichev I. V., Velichko E. N., Shamrai A. V. An Increase in the Transmission Efficiency of an RF Fiber-Optic Line Using the Working Point of an External Modulator Increasing the transmission ratio of microwave photonic path by controlling the operating point of an external modulator *Technical Physics*. 2015, vol. 85, no. 5, pp. 131–136. doi: 10.1134/S1063784215050217 (In Russ.)

4. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator. *Journal of the Optical Society of America B*. 1996, vol. 13, no. 8, pp. 1725–1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725

5. Belkin M. E., Loparev A. V., Semenova Y., Farrell G., Sigov A. S. Tunable RF-band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer-aided design model for its simulation. *Microwave and Optical Technology Lett.* 2011, vol. 53, no. 11, pp. 2474–2477. doi: 10.1002/mopp.26304

6. Zhu D., Pan S., Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2012, vol. 24, pp. 194–196, doi: 10.1109/LPT.2011.2176332.

7. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Electronically tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator. *Tech. Phys.* 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1392–1396. doi: 10.1134/S1063784215090224

8. Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Theory of a tunable spin-wave optoelectronic microwave oscillator. *Technical Physics*. 2015, vol. 60, no. 9, pp. 1397–1401. doi: 10.1134/S1063784215090145

9. Ustinov A. B., Nikitin A. A., Kalinikos B. A. Magnetically Tunable Microwave Spin-Wave Photonic Oscillator. *IEEE Magnetics Lett.* 2015, vol. 6, pp. 1–4. doi: 10.1109/LMAG.2015.2487238

10. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. A Microwave Photonic Generator of Chaotic and Noise Signals. *Tech. Phys. Lett.* 2016, vol. 42, no. 4, pp. 403–406. doi: 10.1134/S1063785016040283

11. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Kalinikos B. A. Dynamic modes of microwave signal autogeneration in a radio photonic ring generator. *Technical Physics*. 2017, vol. 62, no. 2, pp. 287–293. doi: 10.1134/S1063784217020153

12. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Self-Generation of Chaotic Microwave Signal in Spin Wave Optoelectronic Generator. *Phys. Solid State*. 2018, vol. 60, no. 11, pp. 2127–2131. doi: 10.1134/S106378341811032X

13. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Lebedev V. V., Petrov A. N., Shamrai A. V., Kalinikos B. A. A Tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics. *J. of Phys.: Conf. Oct.* 2019, vol. 1326, art. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015

14. Lelievre O., Crozatier V., Berger P., Baili G., Llopis O., Dolfi D., Nouchi P., Goldfarb F., Bretenaker F., Morvan L., Pillet G. A model for designing ultralow noise single- and dual-loop 10-GHz optoelectronic oscillators. 2017, vol. 35, no. 20, pp. 4366–4374. doi: 10.1109/JLT.2017.2729018

15. Ly A., Auroux V., Khayat-zadeh R., Gutierrez N., Fernandez A., Llopis, O. Highly spectrally pure 90-GHz signal synthesis using a coupled optoelectronic. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2018, vol. 30, no. 14, pp. 1313–1316. doi: 10.1109/LPT.2018.2845747

16. Liu A., Yang Y., Song, R., Liu J., Dai J., Tian Z., Xu K. High-performance millimeter-wave synergetic optoelectronic oscillator with regenerative frequency-dividing oscillation. *Optics express*. 2019, vol. 27, no. 7, pp. 9848–9856. doi: 10.1364/OE.27.009848

17. Ghelfi P., Laghezza F., Scotti F., Serafino G., Capria A., Pinna S., Onori D., Porzi C., Scaffardi M., Malacarne A., Vercesi V., Lazzeri E., Berizzi F., Bogoni A. A fully photonics-based coherent radar system. *Nature*. 2014, vol. 507, iss. 7492, pp. 341–345. doi: 10.1038/nature13078

18. Onori D., Scotti F., Laghezza F., Bartocci M., Zaccaron A., Tafuto A., Albertoni A., Bogoni A., Ghelfi P. A photonically enabled compact 0.5–28.5 GHz RF scanning receiver. *J. of Lightwave Technology*. 2018, vol. 36, no. 10, pp. 1831–1839. doi: 10.1109/JLT.2018.2792304

19. Muniz A. L. M., Noque D. F., Borges R. M., Bogoni A., Hirano M., A. Cerqueira S. Jr. All-optical RF amplification toward Gpbs communications and millimeter-waves applications. *Microwave and Optical Technology Lett.* 2017, vol. 59, no. 9, pp. 2185–2189. doi: 10.1002/mopp.30704

20. Noque D. F., Borges R. M., Muniz A. L. M., Bogoni A., A. Cerqueira S. Jr. Thermal and dynamic range characterization of a photonics-based RF amplifier. *Optics Communications*. 2018, vol. 414, pp. 191–194. doi: 10.1016/j.optcom.2018.01.015

21. Xue W., Sales S., Capmany J., Mork J. Wideband 360° microwave photonic phase shifter based on slow light in semiconductor optical amplifiers. *Optics Express*. 2010, vol. 18, pp. 6156–6163. doi: 10.1364/OE.18.006156

22. Sancho J., Lloret J., Gasulla I., Sales S., Capmany J. Fully tunable 360° microwave photonic phase shifter based on a single semiconductor optical amplifier. *Optics Express*. 2011, vol. 19, iss. 18, pp. 17421–17426. doi: 10.1364/OE.19.017421

23. Xue W., Sales S., Mork J., Capmany J. Widely tunable microwave photonic notch filter based on slow and fast light effects. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2009, vol. 21, no. 3, pp. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468

24. Yan Y., Yao J. P. A tunable photonic microwave filter with a complex coefficient using an optical RF phase shifter. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2007, vol. 19, no. 19, pp. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753

25. Yi X., Huang T. X. H., Minasian R. A. Tunable and reconfigurable photonic signal processor with programmable all-optical complex coefficients. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010, vol. 58, no. 11, pp. 3088–3093. doi: 10.1109/TMTT.2010.2076931

26. Song M. H., Torres-Company V., Wu R., Hamidi E., Weiner A. M. Programmable multi-tap microwave photonic phase filtering via optical frequency comb shaping. *Proc. Int. Topical Meet. Microw. Photon. Conf. Singapore, Oct. 18–21, 2011*, pp. 37–40. doi: 10.1109/MWP.2011.6088663

27. Zeng F., Wang J., Yao J. P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on a phase modulator and linearly chirped fiber Bragg gratings. *Optics Lett.* 2005, vol. 30, no. 17, 2203 p. doi: 10.1364/OL.30.002203

28. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on PM-IM conversion. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2005, vol. 17, no. 10, pp. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323

29. Mora J., Capmany J., Loayssa A., Pastor D. Novel

technique for implementing incoherent microwave photonic filters with negative coefficients using phase modulation and single sideband selection. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2006, vol. 18, no. 18, pp. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950

30. Yao J. P., Wang Q. Photonic microwave bandpass filter with negative coefficients using a polarization modulator. *IEEE Photonics Technology Lett.* 2007, vol. 19, no. 9, pp. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942

Information about the authors

Ivan Yu. Tatsenko, Master degree in electronics and nanoelectronics (2020), post graduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5, Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia
<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Tat'yana K. Legkova, Bachelor's degree in electronics and nanoelectronics (2019), the 2st year master degree student of the Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5, Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

Andrey V. Ivanov, Head of Department, POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: fiber-optic components, optoelectronics, microwave photonics.

Address: POLYUS Research Institute of M. F. Stelmakh Joint Stock Company, 3, Bld. 1, Vvedenskogo St., Moscow 117342, Russia

E-mail: aviv58@rambler.ru

Alexey B. Ustinov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2012), Associate Professor (2010) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: linear and non-linear properties of magnetic oscillations and waves in ferromagnetic films and layered structures on their basis; microwave devices, microwave photonics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5, Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: ustinov_rus@yahoo.com

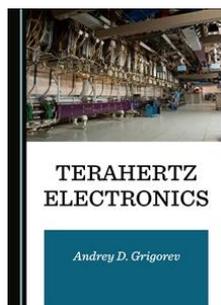
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ



Andrey D. Grigoriev

Terahertz Electronics



ISSN-13: 978-1-5275-5432-0

ISSN-10: 1-5275-5432-5

Date of Publication: 01/09/2020

Pages / Size: 340 / A5

Copyright for the English version is with the authors.

Cambridge Scholars Publishing 2020

The book describes distinctive features of the terahertz radiation interaction with various materials, including the Earth's atmosphere, liquids, dielectrics, superconductors, semiconductors, metals and 2D-structures. It discusses all types of terahertz sources, including lasers, photoconductive antennas, semiconductor diode and transistor generators and amplifiers, and considers terahertz band vacuum devices. The text offers a comparative analysis of these devices and their perspective in the terahertz band, and describes the basic types of terahertz detectors. Also investigated here are the reasons for the appearance of the so-called "terahertz gap" and the means of increasing working frequency and output power of the sources of terahertz radiation. The book also considers the electromagnetics and electron-optical systems of vacuum terahertz devices and their manufacturing technology.