

Исследование перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки

И. Ю. Таценко¹, А. В. Шамрай², С. И. Степанов³, А. Б. Устинов¹✉

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

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Центр научных исследований и высшего образования Энсенада, Энсенада, Мексика

✉ Ustinov_rus@yahoo.com

Аннотация

Введение. В последнее время большой научный и практический интерес вызывает разработка перестраиваемых радиофотонных СВЧ-фильтров. Такие радиофотонные СВЧ-фильтры являются хорошей альтернативой существующим радиочастотным решениям, так как характеризуются низкими потерями, обладают широким диапазоном рабочих частот и могут быть легко интегрированы в различные телекоммуникационные системы. Использование ацетиленовой газовой ячейки и лазера с перестраиваемой длиной волны излучения позволяет создать перестраиваемый в широком диапазоне частот радиофотонный СВЧ-фильтр.

Цель работы. Исследование характеристик перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки, а также определение способов снижения потерь в полосе пропускания фильтра; численное моделирование характеристик радиофотонного СВЧ-фильтра.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось на экспериментальном макете перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра. Фильтр состоял из лазера с перестраиваемой длиной волны излучения, фазового модулятора, ацетиленовой газовой ячейки, оптоволокна, соединяющего газовую ячейку с фотодетектором, и фотодетектора. Теоретическое исследование проводилось посредством математического моделирования амплитудно-частотных характеристик радиофотонного СВЧ-фильтра.

Результаты. Получены экспериментальные амплитудно-частотные характеристики перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра. Исследована перестройка полосы пропускания фильтра посредством изменения частоты излучения лазера. Приведены результаты теоретического расчета амплитудно-частотных характеристик фильтра. Предложен метод снижения потерь в полосе пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра.

Заключение. Предложена конфигурация перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра с использованием ацетиленовой газовой ячейки. Потери в полосе пропускания фильтра составили около –30 дБ. Показано, что для снижения потерь в полосе пропускания фильтра можно использовать лазер с повышенной мощностью излучения и фотодетектор с высоким фототоком.

Ключевые слова: радиофотоника, перестраиваемый СВЧ-фильтр, ацетиленовая газовая ячейка

Для цитирования: Исследование перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки / И. Ю. Таценко, А. В. Шамрай, С. И. Степанов, А. Б. Устинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 68–77. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-68-77

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01438-22-07, грант № FSEE-2022-0017).

Статья поступила в редакцию 16.12.2022; принята к публикации после рецензирования 17.01.2023; опубликована онлайн 28.02.2023

Investigation of a Tunable Microwave Photonic Filter Based on an Acetylene Reference Cell

Ivan Yu. Tatsenko¹, Aleksandr V. Shamrai², Sergey I. Stepanov³, Alexey B. Ustinov¹✉

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Ioffe Institute, St Petersburg, Russia

³Centro de Investigacion cientifica y de Educacion Superior de Ensenada, Ensenada, Mexico

✉ Ustinov_rus@yahoo.com

Abstract

Introduction. Recently, the development of tunable microwave photonic filters has attracted great scientific and practical interest. Such microwave photonic filters are a good alternative to traditional electrical solutions, due to low losses, wide operating frequency range and such filters can be easily integrated into various telecommunication systems. By using an acetylene reference cell and a laser with tunable wavelength can make it possible to create tunable microwave photonic filter with wide operating frequency range.

Aim. Investigation of the characteristic of a tunable microwave photonic filter based on an acetylene reference cell, as well as research possible solution to reduce losses in filter bandwidth; numerical simulation of microwave photonic filter characteristics.

Materials and methods. Experimental study was carried out on an experimental prototype of a tunable microwave photonic filter. The filter consisted of a laser with a tunable wavelength, a phase modulator, an acetylene reference cell, an optical fiber connecting the gas cell with a photodetector, and a photodetector. Theoretical study was carried out by modeling of the transmission characteristics of the microwave photonic filter.

Results. Experimental transmission characteristics of a tunable microwave photonic filter were obtained. The tuning of the filter bandwidth by tuning laser wavelength was studied. Modeling of transmission characteristics of microwave photonic filter was performed. Possible solution to reduce losses in filter bandwidth was proposed.

Conclusion. A tunable microwave photonic filter based on an acetylene reference cell is proposed. Losses in the filter bandwidth was about –30 dB. Using high-power laser and a photodetector with a high photocurrent can reduce losses in the filter bandwidth.

Keywords: microwave photonics, tunable microwave filter, acetylene reference cell

For citation: Tatsenko I. Yu., Shamrai A. V., Stepanov S. I., Ustinov A. B. Investigation of a Tunable Microwave Photonic Filter Based on an Acetylene Reference Cell. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 68–77. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-68-77

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. This work was supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation ("Goszadanie" no. 075-01438-22-07", grant no. FSEE-2022-0017).

Submitted 16.12.2022; accepted 17.01.2023; published online 28.02.2023

Введение. Последние 2 десятилетия радиопhotоника является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений радиотехники [1–7]. Устройства радиопhotоники используются для генерации [8, 9], передачи [10–12] и обработки СВЧ-сигналов [13–15] в различных радиолокационных, телекоммуникационных, навигационных системах и в измерительном оборудовании. В частности, большой интерес вызывает разработка и исследование радиофо-

тонных СВЧ-фильтров [4, 16–21]. За счет использования оптоэлектронной компонентной базы к преимуществам радиопhotонных СВЧ-фильтров можно отнести низкие потери, широкую полосу рабочих частот, возможность перестройки полосы пропускания и невосприимчивость к электромагнитным помехам.

Общий принцип работы радиопhotонных СВЧ-фильтров заключается в переносе СВЧ-сигнала на оптическую несущую с последую-

Исследование перестраиваемого радиопhotонного СВЧ-фильтра
на основе ацетиленовой газовой ячейки

Investigation of a Tunable Microwave Photonic Filter Based on an Acetylene Reference Cell

щей фильтрацией СВЧ-сигнала в оптической области частот. Фильтрация СВЧ-сигнала методами радиофотоники может быть осуществлена за счет использования волоконных брэгговских решеток [22–24], бриллюэновского рассеяния [25–27] и микрокольцевых резонаторов [28–32].

Целью данной статьи является исследование характеристик перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки, а также определение способов снижения потерь в полосе пропускания фильтра.

Экспериментальное исследование перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра. Структурная схема экспериментального макета перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра представлена на рис. 1. Макет состоит из лазера с перестраиваемой длиной волны излучения в диапазоне 1527.6...1565.5 нм; электрооптического фазового модулятора ФМ с полуволновым напряжением 5 В и оптическими потерями около 5 дБ в диапазоне 0...12 ГГц; ацетиленовой газовой ячейки ГЯ с максимумом поглощения на длине волны 1530.37 нм; оптоволокну, соединяющего газовую ячейку с фотодетектором, и фотодетектора ФД с чувствительностью 0.8 А/Вт в диапазоне 0...12 ГГц и сопротивлением нагрузки 50 Ом. На рис. 1 сплошными линиями обозначено оптоволокно, а штриховыми линиями – коаксиальные кабели. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) радиофотонного СВЧ-фильтра измерялись с помощью векторного анализатора цепей Rhode&Schwarz ZVA40.

Рассмотрим принцип работы исследуемого фильтра. На вход фазового модулятора подается оптическое излучение мощностью 8.45 дБм (7 мВт), где оно модулируется СВЧ-сигналом с векторного анализатора цепей. На выходе фазового модулятора появляются две полосы оптических частот относительно несущей, которые находятся в противофазе. Если такой фазомодулированный сигнал подать на фотодетектор, то на его выходе не будет наблюдаться СВЧ-сигнал, так как биение боковых гармоник с несущей будет компенсировать друг друга. Недавно было предложено использовать ацетиленовую газовую ячейку для демодуляции фазомодулированных сигналов при настройке частоты оптической несущей на склон линии поглощения ацетилена [33]. В данной работе для создания перестраиваемого фильтра частота оптической несущей настраивается вне линии поглощения, а ячейка используется для подавления одной из боковых оптических гармоник на частоте $f_c - f_{GC}$, где f_c – частота оптической несущей; f_{GC} – центральная частота поглощения ацетиленовой газовой ячейки. В результате на выходе газовой ячейки возникает биение интенсивности оптического излучения с частотой $f_c - f_{GC}$, которое на выходе фотодетектора преобразуется в СВЧ-сигнал, имеющий такую же частоту $f_c - f_{GC}$. Таким образом, схема имеет максимум передаточной характеристики на частоте $f_c - f_{GC}$, что

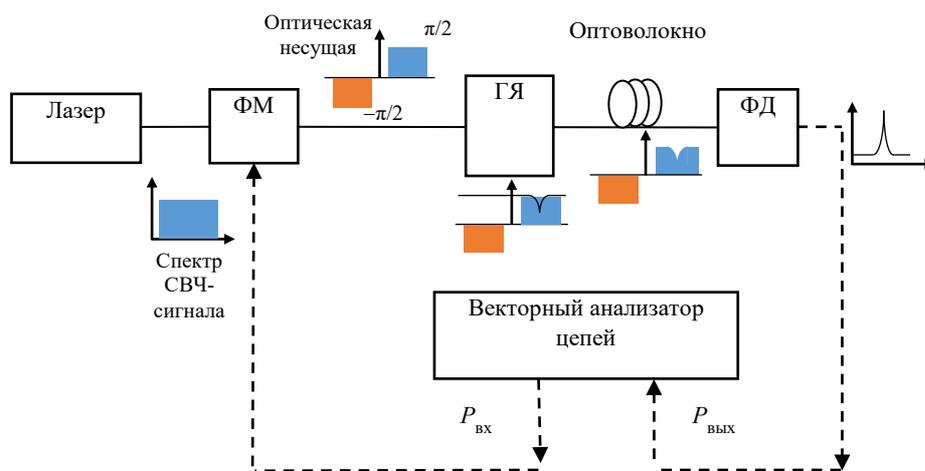


Рис. 1. Структурная схема экспериментального макета перестраиваемого радиофотонного СВЧ-фильтра. На вставках показаны спектры сигнала на соответствующих участках радиофотонного СВЧ-фильтра

Fig. 1. Scheme for measurements of tunable microwave photonic filter. The insets show the signal spectra in the corresponding sections of the microwave photonic filter

соответствует полосе пропускания фильтра. Изменяя частоту отстройки лазерного излучения от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки, можно изменять центральную частоту полосы пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра.

Результаты. На рис. 2 сплошными линиями представлены экспериментальные АЧХ радиофотонного СВЧ-фильтра, полученные при различных отстройках частоты (в диапазоне 4...12 ГГц) лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки. Использовалась наиболее интенсивная линия поглощения Р9 с центральной частотой поглощения 195.895 ТГц (1530.37 нм). Из графиков видно, что центральная частота пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра соответствует отстройке частоты излучения лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки. Полоса пропускания радиофотонного СВЧ-фильтра определяется шириной линии поглощения ацетиленовой газовой ячейки (около 500 МГц) при давлении газа 1066 Па. Коэффициент передачи радиофотонного СВЧ-фильтра составил примерно –30 дБ.

Обсуждение. Теоретический расчет АЧХ радиофотонного СВЧ-фильтра проводился следующим образом. Амплитуда оптического сигнала на выходе фазового модулятора выражается формулой

$$E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ФМ}}(t) = \sqrt{\eta P_{\text{ОПТ}}} \exp(i\omega_c t) \{J_0(m) + iJ_1(m) \exp(i\omega_m t) - iJ_{-1}(m) \exp(-i\omega_m t)\},$$

где η – оптические потери в фазовом модуляторе; $P_{\text{ОПТ}}$ – мощность оптического излучения на входе фазового модулятора; ω_c и ω_m – циклические частоты оптической несущей и модулирующего СВЧ-сигнала; $m = \pi V_m / V_\pi$; V_m – амплитуда модулирующего сигнала; V_π – половновое напряжение фазового модулятора; J_n – функция Бесселя n -го порядка. Как было описано ранее, после фазовой модуляции оптической несущей появляются две боковые оптические гармоники на частотах $\omega_c + \omega_m$ и $\omega_c - \omega_m$ с фазовым сдвигом $\pi/2$. Стоит отметить, что в случае малосигнального приближения ($V_m \ll V_\pi$) влиянием гармоник более высокого порядка можно пренебречь [25–27]. После этого оптический сигнал проходит через ацетиленовую газовую ячейку, сигнал на выходе которой можно записать в виде

$$E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ГЯ}}(t) = \sqrt{\eta P_{\text{ОПТ}}} \exp(i\omega_c t) \{g(\omega_c) J_0(m) + ig(\omega_c + \omega_m) J_1(m) \exp(i\omega_m t) - ig(\omega_c - \omega_m) J_{-1}(m) \exp(-i\omega_m t)\},$$

где $g(\omega)$ – комплексный коэффициент передачи

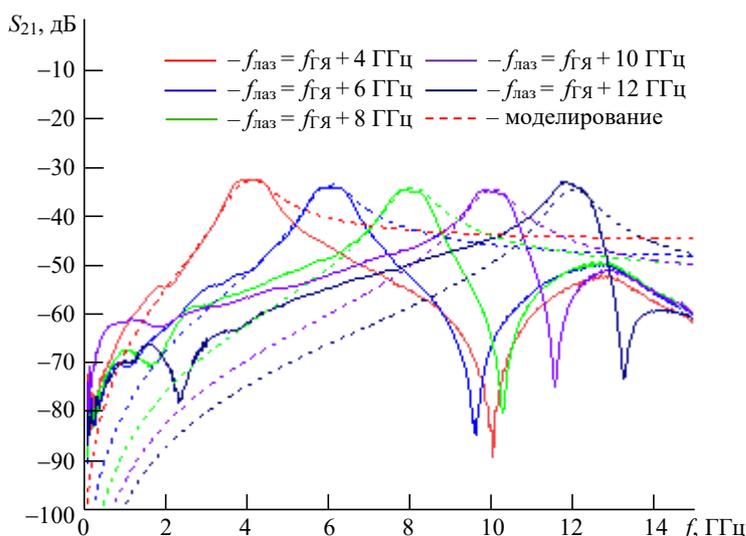


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики радиофотонного СВЧ-фильтра при различных отстройках частоты лазера от центральной частоты поглощения ацетиленовой газовой ячейки

Fig. 2. Transmission characteristics of a tunable microwave photonic filter for different laser detunings from the absorption line center

ацетиленовой газовой ячейки на частоте ω . Частотная зависимость коэффициента передачи $g(\omega)$ определяется доплеровским уширением и хорошо аппроксимируется функцией Гаусса. Из рис. 2 видно, что форма экспериментально полученных АЧХ не похожа на гауссовскую. Можно предположить, что в преобразовании фазовой модуляции в амплитудную участвует также линия дисперсии, которая шире линии поглощения. С учетом этого эффекта линия поглощения с центральной частотой ω_0 и максимальной резонансной оптической плотностью $\alpha_0 L$ описывается выражением

$$g(\omega) = \exp \left\{ -\frac{\alpha_0 L}{2} \left[\frac{1 + i \frac{\omega - \omega_0}{\delta\omega}}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\delta\omega} \right)^2} \right] \right\},$$

где $\delta\omega$ – полуширина линии поглощения. При моделировании АЧХ $\alpha_0 L = 3$, а значение $\delta\omega = 250$ МГц.

Исходя из того, что функция Бесселя обладает свойством $J_1 = -J_{-1}$, получим выражение для расчета мощности оптического сигнала, поступающего в фотодетектор:

$$P_{\text{опт}}^{\text{ФД}}(t) = T\eta P_{\text{опт}} \left| J_0(m)g(\omega_c) + J_1g(\omega_c + \omega_m)\exp(i\omega_m t) + iJ_1g(\omega_c - \omega_m)\exp(-i\omega_m t) \right|^2, \quad (1)$$

где T – пропускание оптоволокна, складывающееся из потерь на стыковку с волокном и оптического поглощения. Компонента мощности оптического излучения, промодулированная на частоте модуляции ω_m , имеет амплитуду

$$P_{\text{опт}}^{\text{ФД}, \omega_m} = 2T\eta P_{\text{опт}} J_0(m)J_1(m) \times \left| g(\omega_c)g(\omega_c + \omega_m) - g(\omega_c)g(\omega_c - \omega_m) \right|.$$

На выходе фотодетектора формируется СВЧ-сигнал, пропорциональный мощности падающего оптического излучения. Мощность выходного СВЧ-сигнала на частоте ω_m рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{вых}} = R \left[2ST\eta P_{\text{опт}} J_0(m)J_1(m) \times \right.$$

$$\left. \times \left| g(\omega_c)g(\omega_c + \omega_m) - g(\omega_c)g(\omega_c - \omega_m) \right| \right]^2,$$

где S – чувствительность фотодетектора; R – сопротивление нагрузки фотодетектора. Коэффициент передачи радиопотонного СВЧ-фильтра $S_{21} = 10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})$, где $P_{\text{вх}}$ – мощность СВЧ-сигнала, подаваемого на СВЧ-вход электрооптического фазового модулятора, а $P_{\text{вых}}$ – мощность СВЧ-сигнала на выходе фотодетектора, рассчитанная по (1).

На рис. 2 штриховыми линиями представлены результаты численного моделирования передаточных характеристик радиопотонного СВЧ-фильтра. Из графиков видно, что результат численного моделирования достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Представленная математическая модель позволяет рассчитывать АЧХ радиопотонного СВЧ-фильтра и оценивать потери, вносимые фильтром в полосе пропускания.

Полученные результаты показывают, что исследованный фильтр имеет сравнительно высокие потери в полосе пропускания. Чтобы их снизить, можно предложить, например, использовать лазер с более высокой мощностью излучения. На рис. 3 показаны результаты математического моделирования АЧХ перестраиваемого радиопотонного СВЧ-фильтра при использовании лазеров мощностями 100 и 300 мВт. Моделирование показывает, что увеличение мощности лазера до 100 мВт снижает потери в полосе пропускания фильтра до

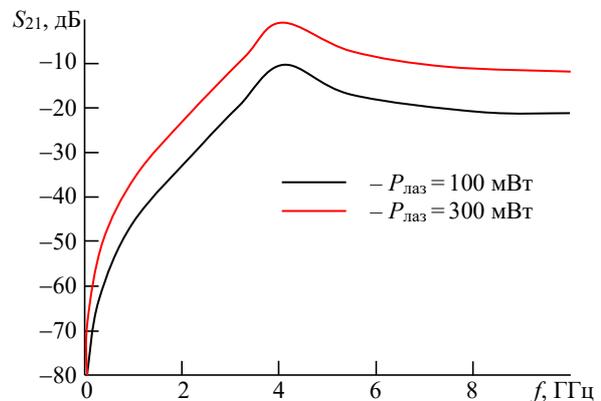


Рис. 3. Результат моделирования АЧХ радиопотонного фильтра при повышенной мощности излучения лазера

Fig. 3. Theoretical transmission characteristics of a microwave photonic filter with increased laser power

–10 дБ. Увеличение мощности лазера до 300 мВт снижает потери до уровня 0 дБ в полосе пропускания фильтра. Однако, чтобы использовать такой лазер с относительно высокой мощностью излучения в схеме радиофотонного фильтра, необходим фотодетектор с высоким фототоком. Полученные результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными в [12], где продемонстрировано увеличение коэффициента передачи оптоволоконной линии передачи до –10 дБ при повышении мощности лазера до 100 мВт.

Заключение и выводы. Предложена конфигурация перестраиваемого радиофотонного

СВЧ-фильтра на основе ацетиленовой газовой ячейки. Перестройка частоты пропускания такого фильтра осуществляется за счет изменения частоты несущего оптического излучения. Экспериментально продемонстрирована возможность перестройки частоты пропускания такого фильтра. Описан метод расчета АЧХ радиофотонного СВЧ-фильтра. Минимальные потери в полосе пропускания фильтра составили около –30 дБ в полосе перестройки центральной частоты 4...12 ГГц. Уровень потерь в полосе пропускания можно снизить за счет использования лазера с повышенной мощностью излучения и фотодетектора с высоким фототоком.

Авторский вклад

Таценко Иван Юрьевич – подготовка статьи; проведение экспериментальных и теоретических исследований.

Шамрай Александр Валерьевич – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обсуждение результатов.

Степанов Сергей Иванович – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обсуждение результатов.

Устинов Алексей Борисович – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Author's contribution

Ivan Yu. Tatsenko, preparation of the paper text; carrying out measurements and calculations.

Aleksandr V. Shamrai, literature review; development of research methods; discussion of the results.

Sergey I. Stepanov, literature review; development of research methods; discussion of the results.

Alexey B. Ustinov, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

Список литературы

1. Seeds A. J., Williams K. J. Microwave photonics // *J. of Lightwave Technology*. 2006. Vol. 24, № 12. P. 4628–4641. doi: 10.1109/JLT.2006.885787

2. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // *Nature photonics*. 2007. Vol. 1, № 6. P. 319–330. doi: 10.1038/nphoton.2007.89

3. Yao J. Microwave photonics // *J. of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27, № 3. P. 314–335. doi: 10.1109/JLT.2008.2009551

4. Yao J. Photonics to the rescue: A fresh look at microwave photonic filters // *IEEE Microwave Magazine*. 2015. Vol. 16, № 8. P. 46–60. doi: 10.1109/MMM.2015.2441594

5. A fully photonics-based coherent radar system / P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, A. Capria, S. Pinna, D. Onori, C. Porzi, M. Scaffardi, A. Malacarne, V. Vercesi, E. Lazzeri, F. Berrizzi,

A. Bogoni // *Nature*. 2014. Vol. 507, № 7492. P. 341–345. doi: 10.1038/nature13078

6. 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. S. Jr. Cerqueira // *Microwave and Optical Technology Let.* 2017. Vol. 59, № 9. P. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704

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

8. 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

9. 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 Physics: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1326, № 1. P. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
10. Li W., Yao J. Dynamic range improvement of a microwave photonic link based on bi-directional use of a polarization modulator in a Sagnac loop // *Optics Express*. 2013. Vol. 21, № 13. P. 15692–15697. doi: 10.1364/OE.21.015692
11. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques / E. Ackerman, G. Betts, W. Burns, J. Campbell, C. Cox, N. Duan, J. Prince, M. Regan, M. H. Roussel // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Piscataway: IEEE*, 2007. P. 51–54. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380216
12. 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
13. Microwave photonic signal processing / J. Capmany, J. Mora, I. Gasulla, J. Sancho, J. Lloret, S. Sales // *J. of Lightwave Technology*. 2012. Vol. 31, № 4. P. 571–586. doi: 10.1109/JLT.2012.2222348
14. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Nature photonics*. 2019. Vol. 13, № 2. P. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
15. 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, № 11. P. 3088–3093. doi: 10.1109/TMTT.2010.2076931
16. Widely tunable microwave photonic notch filter based on slow and fast light effects / W. Xue, S. Sales, J. Mork, J. Capmany // *IEEE Photonics Technology Let.* 2009. Vol. 21, № 3. P. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468
17. Yan Y., Yao J. P. A tunable photonic microwave filter with a complex coefficient using an optical RF phase shifter // *IEEE Photonics Technology Let.* 2007. Vol. 19, № 19. P. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753
18. 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 Let.* 2005. Vol. 30, № 17. P. 2203–2205. doi: 10.1364/OL.30.002203
19. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-optical microwave bandpass filter with negative coefficients based on PM-IM conversion // *IEEE Photonics Technology Let.* 2005. Vol. 17, № 10. P. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323
20. 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 Let.* 2006. Vol. 18, № 18. P. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950
21. Yao J. P., Wang Q. Photonic microwave bandpass filter with negative coefficients using a polarization modulator // *IEEE Photonics Technology Let.* 2007. Vol. 19, № 9. P. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942
22. Li W., Li M., Yao J. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012. Vol. 60, № 5. P. 1287–1296. doi: 10.1109/TMTT.2012.2187678
23. Microwave photonic filter with two independently tunable passbands using a phase modulator and an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating / L. Gao, J. Zhang, X. Chen, J. Yao // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2014. Vol. 62, № 2. P. 380–387. doi: 10.1109/TMTT.2013.2294601
24. Han X., Yao J. Bandstop-to-bandpass microwave photonic filter using a phase-shifted fiber Bragg grating // *J. of Lightwave Technology*. 2015. Vol. 33, № 24. P. 5133–5139. doi: 10.1109/JLT.2015.2492818
25. Zhang W., Minasian R. A. Widely tunable single-passband microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering // *IEEE Photonics Technology Let.* 2011. Vol. 23, № 23. P. 1775–1777. doi: 10.1109/LPT.2011.2169242
26. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity / D. Marpaung, B. Morrison, M. Pagani, R. Pant, D. Y. Choi, B. Luther-Davies, S. J. Madden, B. J. Eggleton // *Optica*. 2015. Vol. 2, № 2. P. 76–83. doi: 10.1364/OPTICA.2.000076
27. Photonic chip based tunable and reconfigurable narrowband microwave photonic filter using stimulated Brillouin scattering / A. Byrnes, R. Pant, E. Li., D. Y. Choi, C. G. Poulton, S. Fan, S. Madden, B. Luther-Davies, B. J. Eggleton // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, № 17. P. 18836–18845. doi: 10.1364/OE.20.018836
28. Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator / J. Palací, G. E. Villanueva, J. V. Galán, J. Marti, B. Vidal B. // *IEEE Photonics Technology Let.* 2010. Vol. 22, № 17. P. 1276–1278. doi: 10.1109/LPT.2010.2053527

29. Zeng F., Yao J. Frequency domain analysis of fiber Bragg grating based phase modulation to intensity modulation conversion // Photonic Applications in Non-linear Optics, Nanophotonics, and Microwave Photonics. 2005. Vol. 5971. P. 594–601. doi: 10.1117/12.628628

30. Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator / G. Qi, J. Yao, J. Seregelyi, S. Paquet, C. Béliisle // J. of Lightwave technology. 2005. Vol. 23, № 9. P. 2687.

31. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping / A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, V. V. Vitko, I. A. Ryabcev, G. A. Zaretskaya, N. A. Cheplagin,

D. A. Konkin, A. A. Kokolov, L. I. Babak., A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // Optics Communications. 2021, Vol. 480. P. 126456. doi: 10.1016/j.optcom.2020.126456

32. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications / A. A. Nikitin, I. A. Ryabcev, A. A. Nikitin, A. V. Kondrashov, A. A. Semenov, D. A. Konkin, A. A. Kokolov, F. I. Sheyerman, L. I. Babak, A. B. Ustinov // Optics Communications. 2022. Vol. 511. P. 127929. doi: 10.1016/j.optcom.2022.127929

33. Self-reference shot-noise-limited phase demodulator with 1530 nm acetylene absorption line / J. Diaz, S. Stepanov, N. Casillas, M. Ocegueda, E. Hernandez, V. Lebedev, P. Agruzov, A. Shamrai // Results in Optics. 2022. Vol. 9. P. 100316. doi: 10.1016/j.rio.2022.100316

Информация об авторах

Таценко Иван Юрьевич – аспирант 3-го года кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиофотоника; оптоэлектронные СВЧ-генераторы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Шамрай Александр Валерьевич – доктор физико-математических наук (2010), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – интегральная оптика; нелинейная оптика; волоконно-оптические датчики; квантовые информационные системы; радиофотоника. Адрес: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ул. Политехническая, д. 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия
E-mail: achamrai@mail.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>

Степанов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук (1988), член Оптического общества Америки, лауреат государственной премии СССР (1985), главный научный сотрудник Центра научных исследований и высшего образования Энсенады. Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – фоторефрактивные материалы; динамические дифракционные решетки; нелинейная оптика; волоконно-оптические датчики. Адрес: Центр научных исследований и высшего образования Энсенады, Карретера Энсенада – Тихуана № 3918, Зона Плайитас, Энсенада, 22860, Мексика
E-mail: steps@cicese.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7094-3061>

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 работ. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах; СВЧ-электроника; интегральная оптика; радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Seeds A. J., Williams K. J. Microwave Photonics. J. of Lightwave Technology. 2006, vol. 24, no. 12, pp. 4628–4641. doi: 10.1109/JLT.2006.885787

2. Capmany J., Novak D. Microwave Photonics Combines Two Worlds. Nature Photonics. 2007, vol. 1, no. 6, pp. 319–330. doi: 10.1038/nphoton.2007.89

3. Yao J. Microwave Photonics. J. of Lightwave Technology. 2009, vol. 27, no. 3, pp. 314–335. doi: 10.1109/JLT.2008.2009551

4. Yao J. Photonics to the Rescue: A Fresh Look at Microwave Photonic Filters. IEEE Microwave Magazine. 2015, vol. 16, no. 8, pp. 46–60. doi: 10.1109/MMM.2015.2441594

5. Ghelfi P., Laghezza F., Scotti F., Serafino G., Capria A., Pinna S., Onori D., Porzi C., Scaffardi M., Malacarne A., Vercesi V., Lazzeri E., Berrizzi F., Bogoni A. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System. *Nature*. 2014, vol. 507, no. 7492, pp. 341–345. doi: 10.1038/nature13078
6. 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 Let.* 2017, vol. 59, no. 9, pp. 2185–2189. doi: 10.1002/mop.30704
7. 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
8. Yao X. S., Maleki L. Optoelectronic Microwave Oscillator. *J. of the Optical Society of America B*. 1996, vol. 13, no. 8, pp. 1725–1735. doi: 10.1364/JOSAB.13.001725
9. 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 Physics: Conf. Ser.* 2019, vol. 1326, no. 1, p. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1326/1/012015
10. Li W., Yao J. Dynamic Range Improvement of a Microwave Photonic Link Based on Bi-Directional Use of a Polarization Modulator in a Sagnac Loop. *Optics Express*. 2013, vol. 21, no. 13, pp. 15692–15697. doi: 10.1364/OE.21.015692
11. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince J., Regan M., Rousell M. H. Signal-to-Noise Performance of Two Analog Photonic Links Using Different Noise Reduction Techniques. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Piscataway, IEEE*, 2007, pp. 51–54. doi: 10.1109/MWSYM.2007.380216
12. 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. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2020, vol. 23, no. 4, pp. 48–56. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-4-48-56 (In Russ.)
13. Capmany J., Mora J., Gasulla I., Sancho J., Lloret J., Sales S. Microwave Photonic Signal Processing. *J. of Lightwave Technology*. 2012, vol. 31, no. 4, pp. 571–586. doi: 10.1109/JLT.2012.2222348
14. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated Microwave Photonics. *Nature Photonics*. 2019, vol. 13, no. 2, pp. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
15. 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
16. Xue W., Sales S., Mork J., Capmany J. Widely Tunable Microwave Photonic Notch Filter Based on Slow and Fast Light Effects. *IEEE Photonics Technology Let.* 2009, vol. 21, no. 3, pp. 167–169. doi: 10.1109/LPT.2008.2009468
17. Yan Y., Yao J. P. A Tunable Photonic Microwave Filter with a Complex Coefficient Using an Optical RF Phase Shifter. *IEEE Photonics Technology Let.* 2007, vol. 19, no. 19, pp. 1472–1474. doi: 10.1109/LPT.2007.903753
18. 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 Let.* 2005, vol. 30, no. 17, pp. 2203–2205. doi: 10.1364/OL.30.002203
19. Wang J., Zeng F., Yao J. P. All-Optical Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients Based on PM-IM Conversion. *IEEE Photonics Technology Let.* 2005, vol. 17, no. 10, pp. 2176–2178. doi: 10.1109/LPT.2005.852323
20. 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 Let.* 2006, vol. 18, no. 18, pp. 1943–1945. doi: 10.1109/LPT.2006.879950
21. Yao J. P., Wang Q. Photonic Microwave Bandpass Filter with Negative Coefficients Using a Polarization Modulator. *IEEE Photonics Technology Let.* 2007, vol. 19, no. 9, pp. 644–646. doi: 10.1109/LPT.2007.894942
22. Li W., Li M., Yao J. A Narrow-Passband and Frequency-Tunable Microwave Photonic Filter Based on Phase-Modulation to Intensity-Modulation Conversion Using a Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2012, vol. 60, no. 5, pp. 1287–1296. doi: 10.1109/TMTT.2012.2187678
23. Gao L., Zhang J., Chen X., Yao J. Microwave Photonic Filter with Two Independently Tunable Passbands Using a Phase Modulator and an Equivalent Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2014, vol. 62, no. 2, pp. 380–387. doi: 10.1109/TMTT.2013.2294601
24. Han X., Yao J. Bandstop-to-Bandpass Microwave Photonic Filter Using a Phase-Shifted Fiber Bragg Grating. *J. of Lightwave Technology*. 2015, vol. 33, no. 24, pp. 5133–5139. doi: 10.1109/JLT.2015.2492818
25. Zhang W., Minasian R. A. Widely Tunable Single-Passband Microwave Photonic Filter Based on Stimulated Brillouin Scattering. *IEEE Photonics Technology Let.* 2011, vol. 23, no. 23, pp. 1775–1777. doi: 10.1109/LPT.2011.2169242
26. Marpaung D., Morrison B., Pagani M., Pant R., Choi D. Y., Luther-Davies B., Madden S. J., Eggleton B. J. Low-Power, Chip-Based Stimulated Brillouin Scattering Microwave Photonic Filter with Ultrahigh Selectivity. *Optica*. 2015, vol. 2, no. 2, pp. 76–83. doi: 10.1364/OPTICA.2.000076

27. Byrnes A., Pant R., Li. E. Choi D. Y., Poulton C. G., Fan S., Madden S., Luther-Davies B., Eggleton B. J. Photonic Chip Based Tunable and Reconfigurable Narrowband Microwave Photonic Filter Using Stimulated Brillouin Scattering. *Optics Express*. 2012, vol. 20, no. 17, pp. 18836–18845. doi: 10.1364/OE.20.018836

28. Palací J., Villanueva G. E., Galán J. V., Marti J., Vidal B. Single Bandpass Photonic Microwave Filter Based on a Notch Ring Resonator. *IEEE Photonics Technology Let.* 2010, vol. 22, no. 17, pp. 1276–1278. doi: 10.1109/LPT.2010.2053527

29. Zeng F., Yao J. Frequency Domain Analysis of Fiber Bragg Grating Based Phase Modulation to Intensity Modulation Conversion. *Photonic Applications in Nonlinear Optics, Nanophotonics, and Microwave Photonics*. 2005, vol. 5971, pp. 594–601. doi: 10.1117/12.628628

30. Qi G., Yao J., Seregelyi J., Paquet S., Bélisle C. Optical Generation and Distribution of Continuously Tunable Millimeter-Wave Signals Using an Optical

Phase Modulator. *J. of Lightwave technology*. 2005, vol. 23, no. 9, p. 2687.

31. Nikitin A. A., Kondrashov A. V., Vitko V. V., Ryabcev I. A., Zaretskaya G. A., Cheplagin N. A., Konkina D. A., Kokolov A. A., Babak L. I., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Carrier-Induced Optical Bistability in the Silicon Micro-Ring Resonators Under Continuous Wave Pumping. *Optics Communications*. 2021, vol. 480, p. 126456. doi: 10.1016/j.optcom.2020.126456

32. Nikitin A. A., Ryabcev I. A., Nikitin A. A., Kondrashov A. V., Semenov A. A., Konkina D. A., Kokolov A. A., Sheyerman F. I., Babak L. I., Ustinov A. B. Optical Bistable SOI Micro-Ring Resonators For Memory Applications. *Optics Communications*. 2022, vol. 511, p. 127929. doi 10.1016/j.optcom.2022.127929

33. Diaz J., Stepanov S. , Casillas N., Ocegueda M., Hernandez E., Lebedev V., Agruzov P., Shamrai A. Self-Reference Shot-Noise-Limited Phase Demodulator with 1530 nm Acetylene Absorption Line. *Results in Optics*. 2022, vol. 9, p. 100316. doi: 10.1016/j.rio.2022.100316

Information about the authors

Ivan Yu. Tatsenko, Postgraduate Student at the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics; optoelectronic oscillators. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Aleksandr V. Shamrai, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2010), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Quantum Electronics of Ioffe Institute. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: integrated optics, non-linear optics; fiber optic sensors; quantum information systems; microwave photonics. Address: Ioffe Institute, 26, Politekhnikeskaya St., St Petersburg 194021, Russia
E-mail: achamrai@mail.ioffe.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0292-8673>

Sergey I. Stepanov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1988), Docent (2013), Member of Optical Society of America, Laureate of the USSR State Prize (1985), Chief Researcher at the Ensenada Center for Scientific Research and Higher Education. The author of 3 monographs and more than 200 scientific publications. Area of expertise: photorefractive materials; dynamic diffraction gratings; non-linear optics; fiber optic sensors. Address: Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, Mexico
E-mail: steps@cicese.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7094-3061>

Alexey B. Ustinov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2012), Docent (2010), Associate Professor at 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 ferro-magnetic films and layered structures on their basis; microwave devices; integrated optics; microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>