

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-14-22

УДК 535.016

Стабилизация системы, усиливающей нелинейности при коллинеарном взаимодействии оптического излучения с бегущей решеткой показателя преломления

Владислав Сергеевич Герасименко^{1✉}, Наталья Дмитриевна Герасименко²,
Виктор Михайлович Петров³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

^{1, 2}СМАРТС-Кванттелеком, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹vsgerasimenko@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9709-3850>

²nat-komolova@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6039-9485>

³vikpetroff@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>

Аннотация

Предмет исследования. Система интегрального электрооптического модулятора и волоконного кольца обратной связи. **Цель работы.** Максимизация нелинейности отклика интегрального электрооптического модулятора и получение вместе с тем стабильного выходного частотного спектра. **Метод.** Экспериментальные исследования спектров коллинеарного взаимодействия оптической (1550 нм) и сверхвысокочастотной (1 ГГц) волн при различных условиях системы обратной связи. **Основные результаты.** Экспериментально продемонстрировано, что для максимизации нелинейности отклика электрооптического модулятора с волоконным кольцом обратной связи необходимо добиться не только синфазного распространения волн внутри области взаимодействия, но и совпадения фаз в начале области взаимодействия при каждом проходе системы. При этом основной вклад в число пиков возникающей оптической частотной гребенки вносит согласование самой с собой сверхвысокочастотной волны. Стабильность выходного частотного спектра во времени в первую очередь обеспечивается самосогласованностью фазы оптического излучения. **Практическая значимость.** Описанная в статье схема позволяет создавать перестраиваемые дискретно источники оптических частотных гребенок, которые в перспективе можно использовать в том числе для систем волоконной связи с частотным мультиплексированием.

Ключевые слова: бегущая решетка показателя преломления, сверхвысокочастотная модуляция оптического излучения, фазовая модуляция оптического излучения, интегральная оптика

Ссылка для цитирования: Герасименко В.С., Герасименко Н.Д., Петров В.М. Стабилизация системы, усиливающей нелинейности при коллинеарном взаимодействии оптического излучения с бегущей решеткой показателя преломления // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 14–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-14-22>

Коды OCIS: 060.0060, 130.0130

Stabilization of a system that enhances collinear interaction nonlinearity of light with a traveling refractive index grating

VLADISLAV S. GERASIMENKO¹✉, NATALYA D. GERASIMENKO², VIKTOR M. PETROV³

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

^{1, 2}SMARTS-Quanttelecom, St. Petersburg, Russia

³Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

¹vsgerasimenko@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-9709-3850>

²nat-komolova@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6039-9485>

³vikpetroff@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>

Abstract

Subject of study. System of integrated electro-optical modulator and fiber circulating loop. **Aim of study.** Maximizing the nonlinearity of the response of an integrated electro-optical modulator and at the same time obtaining a stable output frequency spectrum. **Method.** Experimental studies of the spectra of optical (1550 nm) and radio-frequency (1 GHz) waves collinear interaction for various conditions of the back coupling system. **Main results.** It is experimentally demonstrated that to maximize the nonlinearity of the electro-optical modulator response in a fiber circulating loop, it is necessary to achieve not only in-phase wave propagation within the interaction region, but also phase coincidence at the beginning of the interaction region during each pass of the system. In this case, the main contribution to the number of peaks of the emerging optical frequency comb comes from the matching of the radio-frequency wave with itself. The stability of the output spectrum over time is primarily ensured by the self-consistency of the optical radiation phase. **Practical significance.** The scheme described in the article makes it possible to create discretely tunable sources of optical frequency combs, which in the future can be used, among other things, for fiber communication systems with frequency multiplexing.

Keywords: traveling refractive index gratings, radio-frequency light modulation, phase modulation of optic wave, integrated optics

For citation: Gerasimenko V.S., Gerasimenko N.D., Petrov V.M. Stabilization of a system that enhances collinear interaction nonlinearity of light with a traveling refractive index grating [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 3. P. 14–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-14-22>

OCIS codes: 060.0060, 130.0130

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных интегральных электрооптических модуляторов используют эффект Погкельса [1]. Он состоит в том, что под действием внешнего электрического поля в нецентросимметричном кристалле изменяется показатель преломления, что можно использовать для модуляции фазы проходящего через кристалл излучения. С учетом того, что обладающие эффектом Погкельса материалы характеризуются двулучепреломлением, в общем случае кристалл работает как электрически управляемый вращатель поляризации

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L \left[(n_o - n_e) - \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E_z \right], \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ — изменение угла ориентации линейной поляризации, λ — длина волны оптического излучения, L — длина области взаимодействия, n_o и n_e — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно, r_{33} и r_{13} — элементы тензора электрооптических коэффициентов, E_z — напряженность внешнего электрического поля.

Правильный подбор взаимной ориентации оптической оси кристалла и направлений внешнего поля и поляризации оптической волны позволяют добиться эффективной фазовой модуляции за счет управления показателем преломления

$$\Delta n_z \approx n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z. \quad (2)$$

Способы превратить фазовую модуляцию в амплитудную или даже квадратурную, а также увеличить ширину полосы рабочих частот и уменьшить управляющее напряжение также хорошо известны [1, 2]. На их основе производятся устройства, применяемые как в классической, так и в квантовой волоконно-оптической связи [3–7]. Обычно для создания таких устройств переходят к интегральному исполнению модулирующей системы и подбирают топологию и параметры оптических и сверхвысокочастотных (СВЧ) волноводов под решаемую задачу. При переходе от объемной оптики к интегральной межэлектродные зазоры уменьшаются на порядки, а напряженности электрических полей возрастают в соответствующее число раз. Это приводит к заметному проявлению нелинейностей в части теории систем: в выходном спектре электрооптического модулятора возникают частотные гармоники высших порядков даже при относительно небольших мощностях. Например, в типичных образцах отечественного производства вторая гармоника начинает проявляться при подаче гармонического управляющего сигнала на частоте 5 ГГц мощностью около $-5-0$ дБм (рис. 1) [8]. У модуляторов, произведенных за рубежом, данная характеристика примерно такая же.

В случае с телекоммуникационными задачами гармоники высших порядков являются источником искажений, ограничивающим

диапазон рабочей мощности приемлемостью в конкретной задаче соотношения сигнал/помеха. В то же время в оптике в целом существуют направления, которым нужны источники, выходной спектр которых состоит из равноудаленных дискретных линий, покрывающих некоторую частотную область. Для этого как раз и интересно искать способы усилить нелинейность отклика модулятора.

Таким образом, цель данной работы — максимизировать нелинейность отклика интегрального электрооптического модулятора и получить при этом стабильный выходной частотный спектр.

В принципе идея использования оптической обратной связи для усиления нелинейности была сформулирована достаточно давно [9]. За прошедшие годы было даже предложено несколько способов ее практической реализации за счет обратной связи на брэгговских зеркалах или через оптическое волоконное кольцо [10–12]. Следует отметить, что большинство таких схем использовали оптические усилители, которые вносят свои шумы, особенно заметно проявляющиеся на собственных частотах системы обратной связи при многократном прохождении излучения через нее. Варианты же без усиления, реализованные с помощью брэгговских зеркал, характеризовались заметными спектральными провалами в диапазоне, где эти зеркала

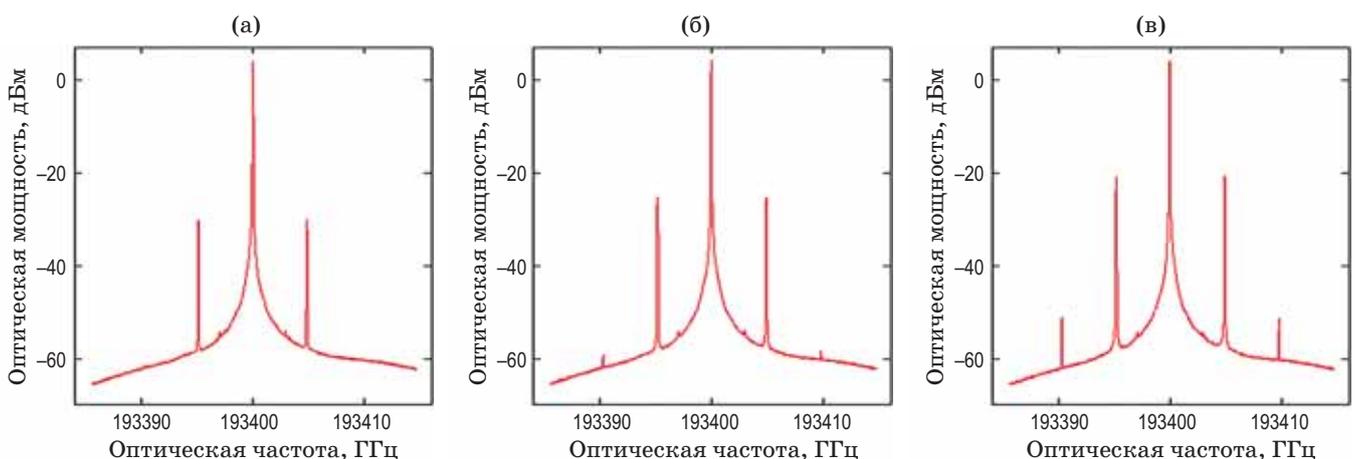


Рис. 1. Появление второй гармоники в выходном спектре электрооптического фазового модулятора при увеличении мощности управляющего СВЧ сигнала. (а) — вторая гармоника отсутствует (-10 дБм), (б) — появление второй гармоники (-5 дБм), (в) — увеличение интенсивности второй гармоники (0 дБм)

Fig. 1. The appearance of the second harmonic in the electro-optical phase modulator output spectrum due to increase in control radio-frequency signal power. (a) There is no second harmonic (-10 dBm), (б) appearance of the second harmonic (-5 dBm), (в) second harmonic intensity increase (0 dBm)

максимально эффективно отражают. Кроме этого, для генерации оптических частотных гребенок предлагалось использовать каскады модуляторов со специальным образом подготовленными управляющими сигналами и линиями оптической и электрической синхронизаций [13, 14]. В этом случае недостатками системы является и само по себе использование нескольких модуляторов (это достаточно дорого с экономической точки зрения), и необходимость создания достаточно сложной системы управления. В данный момент перспективными кажутся обычные модуляторы, реализованные на тонкопленочном ниобате лития [15]. У них, впрочем, пока что довольно много проблем: значительная технологическая сложность подготовки образцов (по сравнению с рассмотренными выше решениями), несколько бóльшая чувствительность системы к внешним повреждающим воздействиям, необходимость использования бесконтактных систем ввода-вывода излучения (либо же разработки специальных решений для таких узлов), большие погонные потери [16].

МЕХАНИЗМ УСИЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Ранее уже обсуждались условия, обеспечивающие эффективное взаимодействие инфракрасного излучения и СВЧ волны в интегральных модуляторах [17]. Повторим основные идеи, понимание которых необходимо для дальнейших рассуждений.

Когда с увеличением рабочей частоты длина волны СВЧ сигнала уменьшается до размеров, сравнимых с длиной электродов, для нормальной работы модулятора становится необходимо использовать электроды бегущей волны. Коллинеарность взаимодействия в интегральном случае обеспечивается геометрией оптического и СВЧ волноводов (рис. 2а). При этом важно добиться согласования фазовой скорости СВЧ волны и групповой — инфракрасного излучения (рис. 2б) [17].

Для максимально возможной частоты модуляции в зависимости от рассогласования эффективных показателей преломления взаимодействующих волн существует аналитическое выражение

$$F = \frac{1,4c}{\pi|n_o - n_\mu|L}, \quad (3)$$

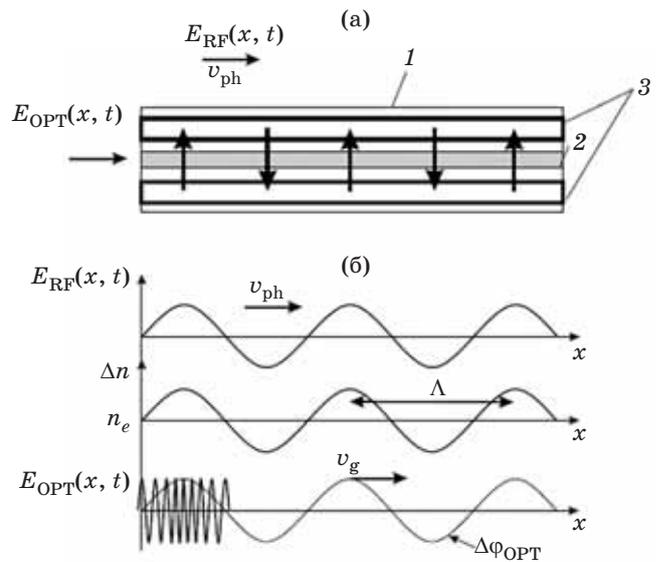


Рис. 2. Коллинеарное взаимодействие оптической и СВЧ волн. Геометрия эксперимента (а), возникновение фазовой модуляции в электрооптических материалах (б). E_{RF} — напряженность поля управляющего СВЧ сигнала, E_{OPT} — напряженность поля оптического излучения, v_{ph} — фазовая скорость СВЧ сигнала, v_g — групповая скорость оптического излучения, Λ — период бегущей решетки показателей преломления, $\Delta\varphi_{OPT}$ — возникающее в результате взаимодействия изменение фазы оптического излучения. 1 — подложка электрооптического материала, 2 — оптический волновод, 3 — пара электродов бегущей волны, создающая волновод для СВЧ излучения [17]

Fig. 2. Collinear interaction of optical and radio-frequency waves. (a) Geometry of the experimental sample, (b) the occurrence of phase modulation in electro-optical materials. E_{RF} is the field of the control radio-frequency signal, E_{OPT} is the field of optical radiation, v_{ph} is the phase velocity of the radio-frequency signal, v_g is the group velocity of optical radiation, Λ is the period of the traveling refractive index grating, $\Delta\varphi_{OPT}$ is the change in the phase of optical radiation resulting from the interaction. (1) Electro-optical material wafer, (2) optical waveguide, (3) pair of traveling wave electrodes, creating a waveguide for radio-frequency signal [17]

где F — частотная полоса модулятора, c — скорость света в вакууме, n_o и n_μ — эффективные показатели преломления оптической и СВЧ волн соответственно, а L — длина области взаимодействия, как и в формуле (1) [17].

Следует отметить, что эффективный показатель преломления СВЧ волны зависит от погонных характеристик электродов, которые

в том числе связаны с волновым сопротивлением и потерями. К тому же, для эффективной модуляции необходимо согласование импедансов питающей системы и линии передачи [17]. Кроме того, типичные подложки ниобата лития — основного материала для создания модуляторов, используемого и в наших образцах, обычно имеют размер в пределах 10 см. Все это ограничивает физически возможную длину области взаимодействия.

Для решения данной проблемы и было предложено повторно пропускать часть выходного излучения через модулятор. По факту остающееся в системе «модулятор — оптоволоконное кольцо обратной связи» излучение оказывается проходящим черезкратно удлинившуюся область взаимодействия. Дополнительной задачей в этом случае оказывается согласование фаз взаимодействующих волн еще и на входе модулятора между последовательными проходами оптоволоконного кольца.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментов использовалась следующая схема: излучение лазера подавалось через оптический изолятор на первый вход оптоволоконного объединителя, его выход соединялся со входом образца фазового модулятора, выход которого вел в свою очередь ко входу делителя, первый выход которого подавал излучение на оптический спектроанализатор, а второй соединялся со вторым входом объединителя, замыкая кольцо обратной связи (рис. 3). Общая длина системы обратной связи составила примерно 6 м, при этом имелась возможность смыкать-размыкать это кольцо (включать-выключать обратную связь) и достаточно легко заменять светоделители, чтобы исследовать различные коэффициенты обратной связи. Кроме того, в опытах использовался образец фазового модулятора, имеющий два электрода — бегущей волны для создания бегущей решетки показателя преломления и емкостный для тонкой подстройки оптической длины кольца.

Первый опыт с делителем 50/50 продемонстрировал лишь незначительные изменения интенсивностей спектральных пиков. Даже при использовании делителя 25/75 наблюдался относительно слабый эффект: СВЧ резонанс

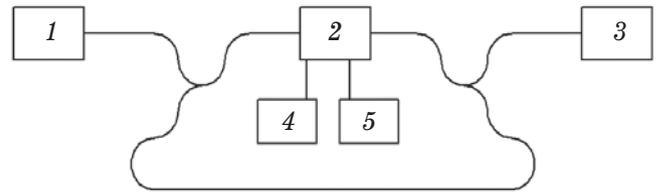


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. 1 — лазерный источник, 2 — фазовый модулятор, 3 — оптический спектроанализатор, 4 — источник модулирующего электрического радиочастотного сигнала, 5 — источник постоянного напряжения. Оптический делитель и объединитель изображены разделением/схождением волокон, оптический изолятор на выходе лазера и волоконные коннекторы опущены

Fig. 3. Experimental setup. (1) Laser source, (2) phase modulator, (3) optical spectrum analyzer, (4) source of modulating electrical radio-frequency signal, (5) constant voltage source. Optical splitter and combiner are shown as fiber separation/convergence, optical isolator at the laser source output and fiber connectors are not shown

добавил к наблюдаемым гармоникам по два порядка (рис. 4). Попытки «поймать» условия оптического резонанса не увенчались успехом. В момент изменения подаваемого на емкостный электрод напряжения происходило резкое повышение или понижение интенсивностей дополнительных частотных порядков, повторяющееся с некоторой периодичностью. Однако при усреднении результатов измерений спектров за несколько таких периодов описанное явление не оказывало какого-либо влияния на итоговую картину: независимо от подаваемого напряжения и типа изменения (уширения или сужения с одной или двух сторон) спектра в моменте различия между усредненными картинками оказывались такими же, как при нескольких последовательных усредненных измерениях при одних условиях.

Во второй серии экспериментов с данной схемой использовался делитель 10/90, что явно продемонстрировало резонансные эффекты. Без обратной связи наблюдалась оптическая частотная гребенка, содержавшая гармоники 8 порядков (рис. 5а). Включение обратной связи в нерезонансных условиях почти не изменило картину: произошло незначительное усиление всех боковых пиков, что стало особенно заметно для гармоник где-то до 3–4 порядков,

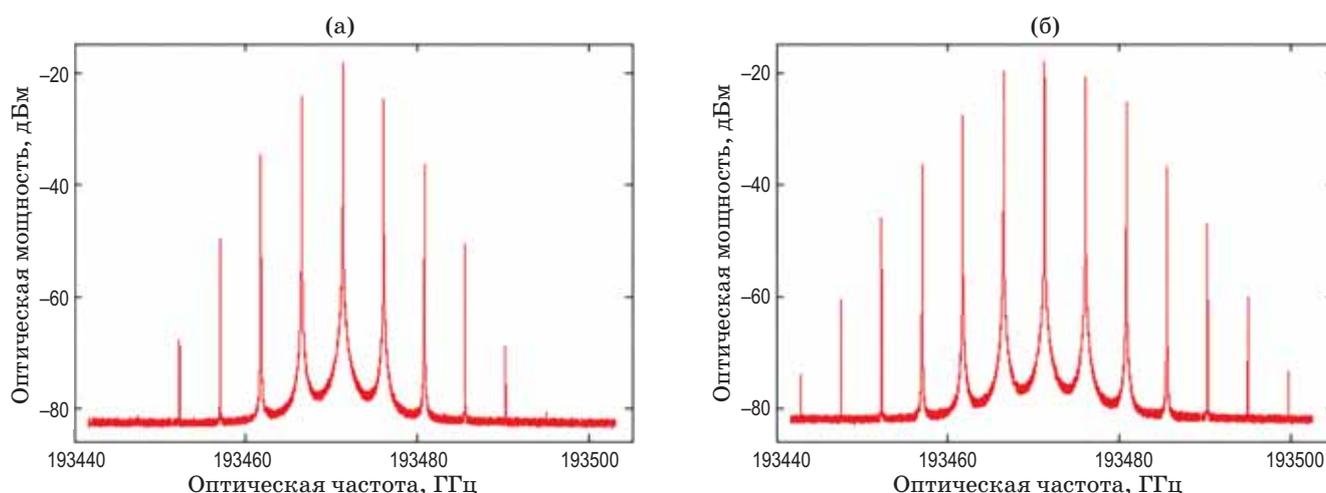


Рис. 4. Выходные спектры модулятора без обратной связи (а), в условиях СВЧ резонанса (б)

Fig. 4. Modulator output spectra (a) without back coupling, (б) circulating loop in a radio-frequency resonance

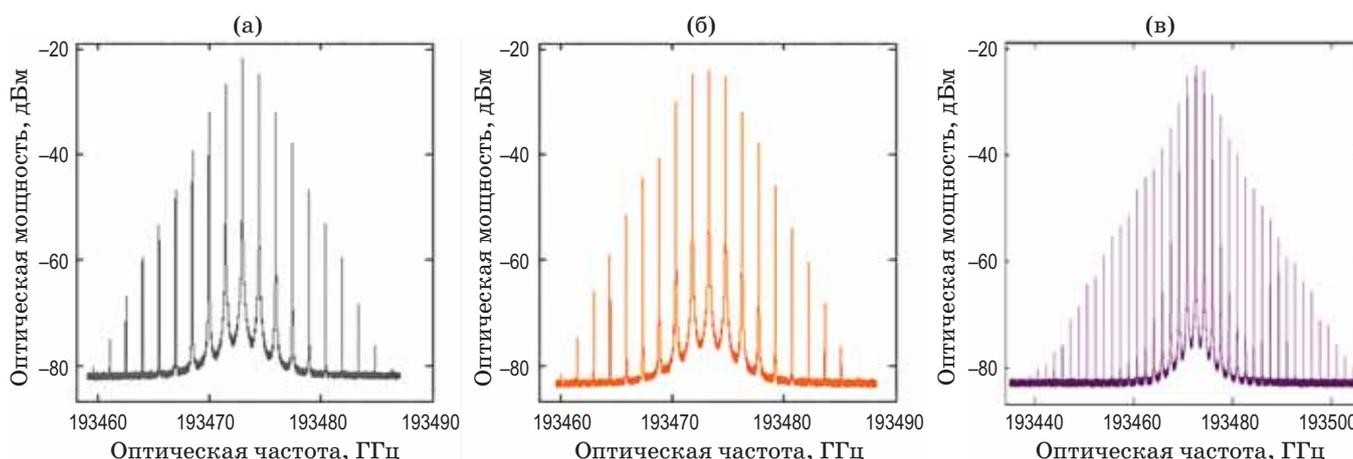


Рис. 5. Выходные спектры фазового модулятора без обратной связи (а), с обратной связью, но в нерезонансных условиях (б), в условиях резонанса (в)

Fig. 5. Output spectra of the phase modulator (a) without back coupling, (б) circulating loop without a resonance, (в) circulating loop in a resonance

но дополнительные боковые частоты не появились (рис. 5б). Попадание же в резонансные условия увеличило число боковых спектральных пиков до 19 с каждой стороны (рис. 5в). При этом из этих 19 пиков 8 — исходные, еще 9–12 присутствовали в спектре стабильно, а оставшиеся 13–19 — то появлялись, то пропадали, тем не менее явно присутствуя при усреднении. Также можно отметить, что спектральные пики, относящиеся к последней группе, очень редко отсутствовали вовсе, почти никогда не возникали одновременно, но почти всегда в наборе последовательных

неусредненных измерений было видно, как они колеблются то в сторону положительных, то отрицательных порядков гармоник.

В связи с описанным периодическим процессом с гармониками высших порядков было решено попытаться уменьшить влияние температурных эффектов на оптические параметры кольца обратной связи. Уже при простом укрывании волоконных элементов вспененными материалами, используемыми при стандартной транспортной упаковке одиночных изделий, получилось добиться увеличения ширины стабильной части спектра на 1–2 гармоники.

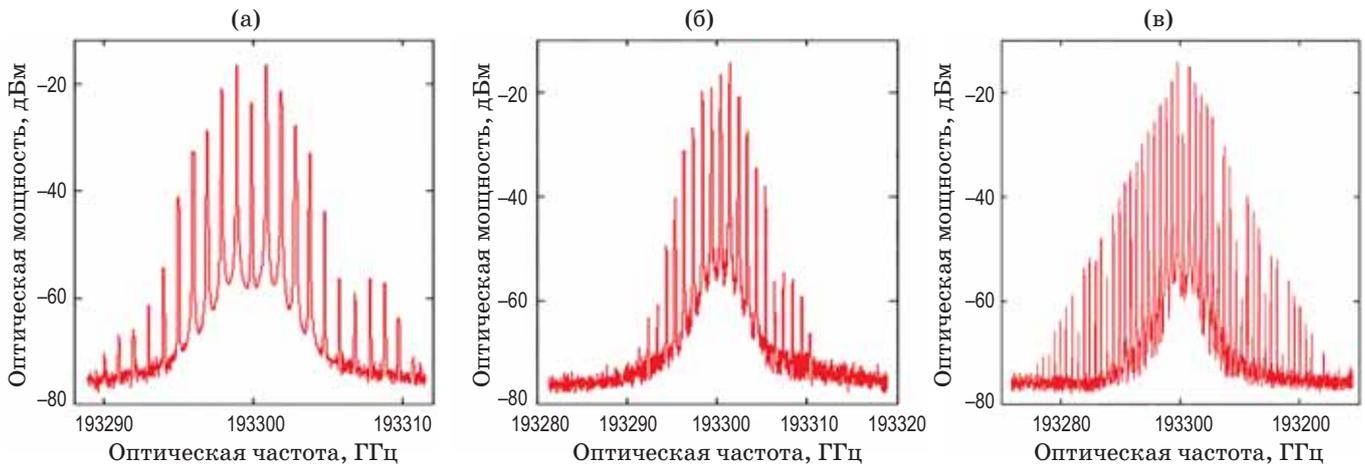


Рис. 6. Выходные спектры термостабилизированного фазового модулятора без обратной связи (а), с обратной связью, но в нерезонансных условиях (б), в условиях резонанса (в)

Fig. 6. Thermally stabilized phase modulator output spectra (a) without back coupling, (б) circulating loop without a resonance, (в) circulating loop in a resonance

По-настоящему же значимый эффект наблюдался при следующей модификации экспериментальной установки: все оптические волокна были намотаны на медные катушки, которые в свою очередь устанавливались на элементы Пельте, и все это размещалось в закрытом корпусе; свободное место для уменьшения конвективных потоков заполнялось минеральной ватой. Даже без использования элементов Пельте чисто за счет пассивной стабилизации получилось не только расширить число стабильно присутствующих пиков, но и максимальный спектральный порядок: общее число частотных пиков выросло до 23–24, из которых около 18 присутствовали в спектре достаточно стабильно (хоть и с изменяющейся интенсивностью). В данном случае уже появилась возможность измерить среднеквадратическое отклонение температуры катушек за 10 мин: оно составило примерно 0,04 °С.

При включении же активной термостабилизации с помощью элементов Пельте, термодатчиков и аналоговых PID-регуляторов среднеквадратическое отклонение температуры получилось уменьшить до 0,005–0,010 °С, что сопровождалось увеличением числа стабильно присутствующих в спектре частотных пиков до 20. Это позволило продуктивно измерять спектры без усреднения (рис. 6). Кроме того, стабильность интенсивности этих пиков также возросла. В связи с этим возникло желание оценить изменение оптической длины

кольца. С учетом небольшого изменения температуры и работы в целом в условиях, близких к нормальным, термооптический эффект рассматривался в линейном приближении с коэффициентом примерно $1,24 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [18]. Для оценки флуктуации оптической длины кольца было взято выражение

$$\Delta l \approx L_r \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T, \quad (4)$$

где Δl — изменение оптической длины петли обратной связи, L_r — длина оптического волокна, формирующего петлю обратной связи, $\partial n / \partial T$ — термооптический коэффициент, ΔT — среднеквадратическое отклонение температуры. Подстановка в выражение (4) приведенных выше экспериментальных значений дает $\Delta l \approx 372 \text{ нм}$.

В связи с этим была вновь предпринята попытка исследовать влияние тонкой подстройки оптической длины петли обратной связи на уже стабилизированную систему, но даже при таких условиях оптического резонанса (или каких-то статистически значимых его признаков при измерениях с усреднением) добиться не получилось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые изучено влияние включения СВЧ интегрального модулятора в волоконную систему оптической обратной

связи без усиления на нелинейность его отклика. Серия из нескольких экспериментов показала, что усиление нелинейности происходит всегда. Однако эффект проявляется тем сильнее, чем выше коэффициент обратной связи. Кроме того, необходимо согласовать фазы модулирующей волны на входе модулятора при каждом проходе волоконного кольца — без этого усиление нелинейности почти не происходит. В случае же попадания фазы в резонанс число пиков оптической частотной гребенки на выходе системы может увеличиваться кратно. Резонанс же модулируемой волны тоже влияет на ширину спектра, но в значительно меньшей степени, и, тем не менее, именно он обеспечивает ста-

бильность наблюдаемой на выходе системы картины.

Выполненное исследование демонстрирует кратное увеличение нелинейности отклика системы в сравнении с одиночным модулятором при попадании длин СВЧ и оптической волн в собственные длины волн петли обратной связи. При этом 20 из 23 гармоник высших порядков в выходном спектре стабильно присутствуют во времени, чего ранее достичь не удавалось. Описанная в статье схема позволяет создавать перестраиваемые дискретно источники оптических частотных гребенок, которые в перспективе можно использовать в том числе для систем волоконной связи с частотным мультиплексированием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Петров В.М., Шамрай А.В. Интерференция и дифракция для информационной фотоники. СПб.: Лань, 2019. 460 с.
2. Yariv A. Introduction to optical electronics, 2nd ed. N.Y.: Holt, Rinehart and Winston, 1976. 438 p.
3. Петров В.М., Агрузов П.М., Лебедев В.В., Ильичев И.В., Шамрай А.В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН. 2021. Т. 191. № 7. С. 760–780. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038871>
4. Sajeed S., Chaiwongkhot P., Huang A., et al. An approach for security evaluation and certification of a complete quantum communication system // Sci. Rep. 2021. V. 11. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84139-3>
5. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yanet A., et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. V. 6. № 1. P. 69–82. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
6. Vashukevich E.A., Lebedev V.V., Ilichev I.V., et al. Broadband chip-based source of quantum noise with electrically controllable beam splitter // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. № 6. P. 064039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.064039>
7. Петров В.М., Коротеев Д.А., Семисалов Д.А. и др. Интегрально-оптические C-NOT гейты: оценка основных параметров для практической реализации // Фотоника. 2023. № 1. С. 58–70. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.58.70>
8. Петров В.М., Шамрай А.В., Ильичев И.В. и др. Отечественные СВЧ интегрально-оптические модуляторы для квантовых коммуникаций // Фотоника. 2020. Т. 14. № 5. С. 414–422. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423>
9. Ho K.P., Kahn J.M. Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop // IEEE Photonics Technol. Lett. 1993. V. 5. № 6. P. 721–725. <https://doi.org/10.1109/68.219723>
10. Kawanishi T., Sasaki M., Shimotsu S., et al. Reciprocating optical modulation for harmonic generation // IEEE Photonics Technol. Lett. 2001. V. 13. № 8. P. 854–856. <https://doi.org/10.1109/68.935826>

REFERENCES

1. Petrov V.M., Shamray A.V. Interference and diffraction for information photonics [in Russian]. St. Petersburg: "Lan" Publ., 2019. 460 p.
2. Yariv A. Introduction to optical electronics, 2nd ed. N.Y.: Holt, Rinehart and Winston, 1976. 438 p.
3. Petrov V.M., Agruzov P.M., Lebedev V.V., Il'ichev I.V., Shamray A.V. Broadband integrated optical modulators: Achievements and prospects // Physics-Uspekhi. 2021. V. 64. № 7. P. 722. <https://doi.org/10.3367/ufne.2020.11.038871>
4. Sajeed S., Chaiwongkhot P., Huang A., et al. An approach for security evaluation and certification of a complete quantum communication system // Sci. Rep. 2021. V. 11. № 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84139-3>
5. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yanet A., et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. V. 6. № 1. P. 69–82. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
6. Vashukevich E.A., Lebedev V.V., Ilichev I.V., et al. Broadband chip-based source of quantum noise with electrically controllable beam splitter // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. № 6. P. 064039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.064039>
7. Petrov V.M., Koroteev D.A., Semisalov D.A., et al. Integrated optical C-NOT gates: Estimation of the main parameters for practical design // Photonics Russia. 2023. № 1. P. 58–70. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.58.70>
8. Petrov V.M., Shamrai A.V., Il'ichev I.V., et al. National microwave integrated optical modulators for quantum communications // Photonics Russia. 2020. V. 14. № 5. P. 414–422. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423>
9. Ho K.P., Kahn J.M. Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop // IEEE Photonics Technol. Lett. 1993. V. 5. № 6. P. 721–725. <https://doi.org/10.1109/68.219723>
10. Kawanishi T., Sasaki M., Shimotsu S., et al. Reciprocating optical modulation for harmonic generation // IEEE Photonics Technol. Lett. 2001. V. 13. № 8. P. 854–856. <https://doi.org/10.1109/68.935826>

11. Kogahara S., Shinada S., Nakajima S., et al. Reciprocating optical modulation on erbium-doped LiNbO₃ for harmonic generation // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2007. V. 19. № 19. P. 1565–1567. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.904339>
12. Kawanishi T., Sakamoto T., Shinada S., Izutsu M. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation // *IEICE Electronics Exp.* 2004. V. 1. № 8. P. 217–221. <https://doi.org/10.1587/elex.1.217>
13. Dou Y., Zhang H., Yao M. Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2012. V. 24. № 9. P. 727–729. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2187330>
14. Metcalf A.J., Torres-Company V., Leaird D.E., Weiner A.M. High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics.* 2013. V. 19. № 6. P. 231–236. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2268384>
15. Ren T., Zhang M., Wang C., et al. An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2019. V. 31. № 11. P. 889–892. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2911876>
16. Parfenov M., Agruzov P., Tronev A., et al. Metal electrodes for filtering the localized fundamental mode of a ridge optical waveguide on a thin lithium niobate nanofilm // *Nanomaterials.* 2023. V. 13. № 20. P. 2755. <https://doi.org/10.3390/nano13202755>
17. Герасименко Н.Д., Герасименко В.С., Петров В.М. Эффективное коллинеарное взаимодействие излучения с бегущей решеткой показателя преломления в электрооптических волноводах в ниобате лития // *Оптический журнал.* 2022. Т. 89. № 4. С. 3–11. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-04-03-11>
18. Есипенко И.А., Лыков Д.А. Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа и ее экспериментальная верификация // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* 2017. № 5. С. 31–46. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-5-31-46>
11. Kogahara S., Shinada S., Nakajima S., et al. Reciprocating optical modulation on erbium-doped LiNbO₃ for harmonic generation // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2007. V. 19. № 19. P. 1565–1567. <https://doi.org/10.1109/LPT.2007.904339>
12. Kawanishi T., Sakamoto T., Shinada S., Izutsu M. Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation // *IEICE Electronics Exp.* 2004. V. 1. № 8. P. 217–221. <https://doi.org/10.1587/elex.1.217>
13. Dou Y., Zhang H., Yao M. Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2012. V. 24. № 9. P. 727–729. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2187330>
14. Metcalf A.J., Torres-Company V., Leaird D.E., Weiner A.M. High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics.* 2013. V. 19. № 6. P. 231–236. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2013.2268384>
15. Ren T., Zhang M., Wang C., et al. An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2019. V. 31. № 11. P. 889–892. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2911876>
16. Parfenov M., Agruzov P., Tronev A., et al. Metal electrodes for filtering the localized fundamental mode of a ridge optical waveguide on a thin lithium niobate nanofilm // *Nanomaterials.* 2023. V. 13. № 20. P. 2755. <https://doi.org/10.3390/nano13202755>
17. Gerasimenko N.D., Gerasimenko V.S., Petrov V.M. Effective collinear interaction of radiation with a traveling refractive index grating in electro-optical waveguides in lithium niobate // *Journal of Optical Technology.* 2022. V. 89. № 4. P. 191–196. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000191>
18. Esipenko I.A., Lykov D.A. Mathematical model of thermal drift of a fiber-optic gyroscope and its experimental verification // *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr. [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.].* 2017. № 5. P. 31–46. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2017-5-31-46>

АВТОРЫ

Владислав Сергеевич Герасименко — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; инженер, SMARTS-Кванттелеком, Санкт-Петербург, 199178, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-9709-3850>; vsgerasimenko@itmo.ru

Наталья Дмитриевна Герасименко — инженер, SMARTS-Кванттелеком, Санкт-Петербург, 199178, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-6039-9485>; nat-komolova@yandex.ru

Виктор Михайлович Петров — доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, 199034, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>; Scopus ID: 24773525500; vikpetroff@mail.ru

AUTHORS

Vladislav S. Gerasimenko — PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Engineer, SMARTS-Quanttelecom, St. Petersburg, 199178, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-9709-3850>; vsgerasimenko@itmo.ru

Natalya D. Gerasimenko — Engineer, SMARTS-Quanttelecom, St. Petersburg, 199178, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6039-9485>; nat-komolova@yandex.ru

Viktor M. Petrov — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8523-0336>; Scopus ID: 24773525500; Scopus ID: 24773525500; vikpetroff@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.10.2023
Одобрена после рецензирования 06.12.2023
Принята к печати 28.01.2024

The article was submitted to the editorial office 31.10.2023
Approved after review 06.12.2023
Accepted for publication 28.01.2024