



Роль мод утечек в работе устройств на основе интегрально-оптических интерферометров Маха-Цендера

Д. А. Коротеев, В. С. Герасименко, Н. Д. Герасименко, В. М. Петров
Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследовано влияние мод утечки на работу СВЧ интегрально-оптических амплитудных модуляторов и квантовых генераторов шума, построенных по схеме интерферометра Маха-Цендера. Показано, что рассеяние оптической мощности через моды утечек приводит к уменьшению динамического диапазона амплитудного модулятора, и, что самое главное, к возможности атаки нарушителем на квантовую линию связи. Для квантовых генераторов шума, построенных по схеме интерферометра Маха-Цендера, моды утечки обеспечивают проникновение в схему генератора шума вакуумных флуктуаций, что необходимо для работы генератора.

Ключевые слова: интегрально-оптические амплитудные модуляторы, квантовые генераторы шума, моды утечки, атаки на квантовые линии связи

Статья получена: 06.04.2022

Статья принята: 27.04.2022

1. ВВЕДЕНИЕ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Интегрально-оптические интерферометры, построенные по схеме интерферометра Маха-Цендера (ИМЦ), используются для создания

The Role of Leaky Modes in The Operation of Devices Based on Integrated-Optical Mach-Zehnder Interferometers

D. A. Koroteev, V. S. Gerasimenko, N. D. Gerasimenko, V. M. Petrov
ITMO National Research University Saint-Petersburg, Russia

The effect of leaky modes on the operation of RF integrated-optical amplitude modulators and quantum noise generators made according to the Mach-Zehnder interferometer scheme has been studied. It is shown that the optical power dissipation through the leaky modes leads to a decrease in the dynamic range of the amplitude modulator, and, most importantly, to the possible intruder's attack on a quantum communication line. In relation to the quantum noise generators made according to the Mach-Zehnder interferometer scheme, the leaky modes ensure penetration of vacuum fluctuations into the noise generator circuit that is necessary for the generator operation.

Keywords: integrated-optical amplitude modulators, quantum noise generators, tunnelling modes, attacks on the quantum communication lines

Received on: 06.04.2022

Accepted on: 20.04.2022

1. INTRODUCTION, PROBLEM STATEMENT

The integrated-optical interferometers made according to the Mach-Zehnder interferometer (MZI) scheme are used to implement the super-broadband quantum noise generators [1, 2], high-speed amplitude modulators [3], quantum photonic processors [4], and other high-precision and broadband devices based on the integrated optics [5]. At present, particular attention

широкополосных квантовых генераторов шума [1, 2], быстродействующих амплитудных модуляторов [3], квантовых фотонных процессоров [4] и других высокоточных, широкополосных устройств на основе интегральной оптики [5]. Особое внимание к таким устройствам сейчас привлечено в связи с бурным развитием интегрально-оптических чипов для создания различных управляемых квантовых фотонных гейтов [6] и вычислителей [7, 8]. Анализ литературы показывает, что в основе всех этих устройств лежит один или несколько связанных устройств между собой ИМЦ, имеющих один или два входа и один или два выхода. Наиболее характерные случаи показаны на рис. 1.

Возникновение мод утечек в примерах (рис. 1b, c) есть следствие необходимости выполнения унитарности переноса энергии от входа к выходу устройства, а в более общем случае – необходимости выполнения закона сохранения энергии. Действительно, при разнице фаз в плечах интерферометра, равной π , на выходе интерферометра Вых1 мощность равна нулю. В этом случае оптическая мощность на выход не поступает, а рассеивается по модам утечки.

Пожалуй впервые моды утечки были описаны в работах Маркувица [9] и Бэроуна [10, 11]. В своей статье Маркувиц предлагает использовать моды утечки в качестве решения волнового уравнения. Экспериментально моды утечки были обнаружены Холлом и Йе [12]. В данном эксперименте был использован трехслойный волновод ZnSe на подложке из GaSe, в котором теоретически могут существовать только моды утечки. В ходе эксперимента были получены фотографии TE и TM мод для подложек различной толщины. В дальнейшем поведение мод утечки в волноводах разной формы было описано Снайдером и Ловом [13]. Также ими были продемонстрированы решения задач распространения поля в волноводе с использованием мод утечки. Таким образом моды утечки являются достаточно хорошо изученным и теоретически описанным явлением с экспериментальным подтверждением.

В процессе выполнения многочисленных работ по сборке и настройке различных интегрально-оптических интерферометров мы также многократно могли непосредственно наблюдать «выход» оптической мощности из ИМЦ в направлениях, определяемым модами утечки.

В данной работе мы приводим результаты моделирования мод утечки в электрически-

is drawn to such devices due to the rapid development of integrated optical chips for producing various controlled quantum photon gates [6] and computers [7, 8]. The literature data analysis shows that all these devices are based on one or several interconnected MZIs that have one or two inputs and one or two outputs. The most typical cases are shown in Fig. 1.

The occurrence of leaky modes shown in Fig. 1b, c is a consequence of the need to obtain the unitarity of energy transfer from the device input to the output, and in a more general case, the need to implement the energy conservation law. Indeed, when the phase difference in the interferometer arms is equal to π , the interferometer output power $Out1$ is equal to zero. In this case, the optical power is not supplied to the output, but it is dissipated by the tunnelling modes.

It appears that for the first time, the leaky modes were described in the works of Markowitz [9] and Berown [10, 11]. In his paper, Markowitz proposes

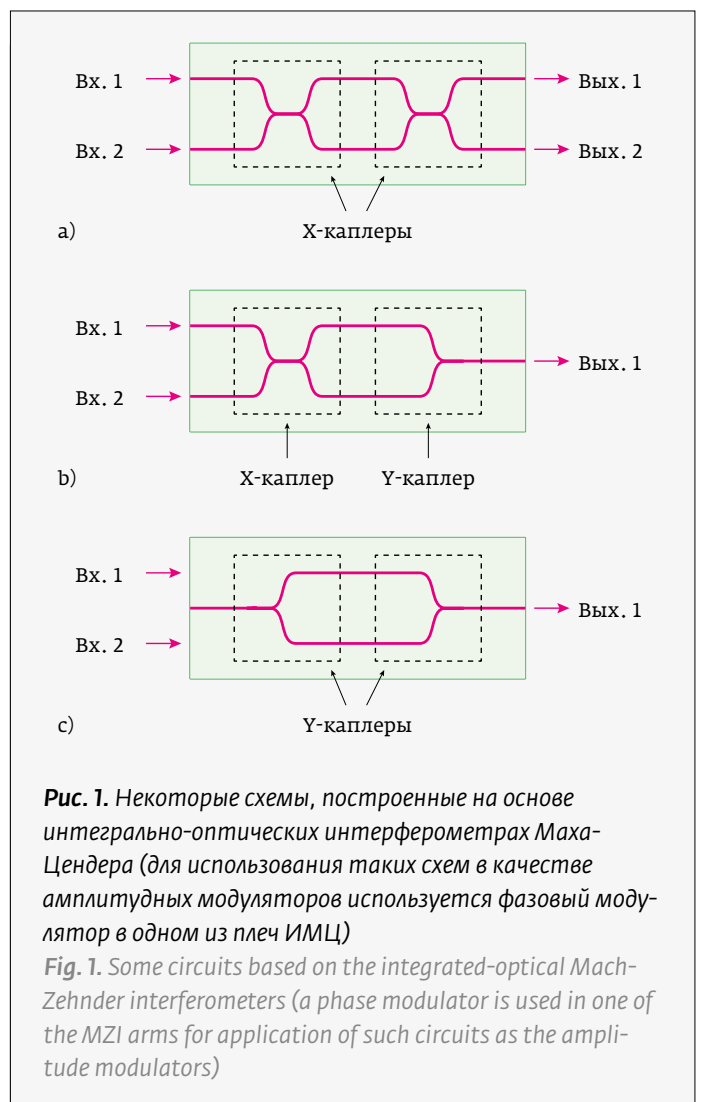


Рис. 1. Некоторые схемы, построенные на основе интегрально-оптических интерферометрах Маха-Цендера (для использования таких схем в качестве амплитудных модуляторов используется фазовый модулятор в одном из плеч ИМЦ)

Fig. 1. Some circuits based on the integrated-optical Mach-Zehnder interferometers (a phase modulator is used in one of the MZI arms for application of such circuits as the amplitude modulators)

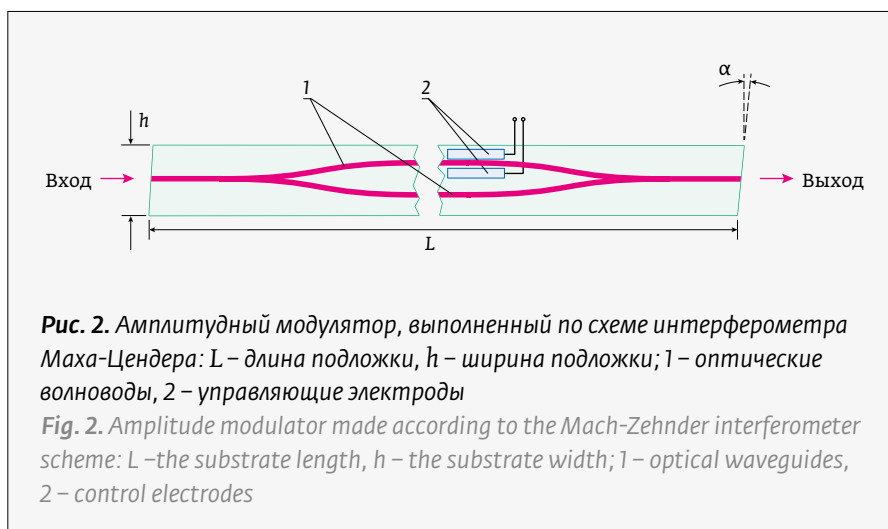
управляемых интегрально-оптических ИМЦ, созданных на поверхности подложки из кристалла ниобат лития (LiNbO_3).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

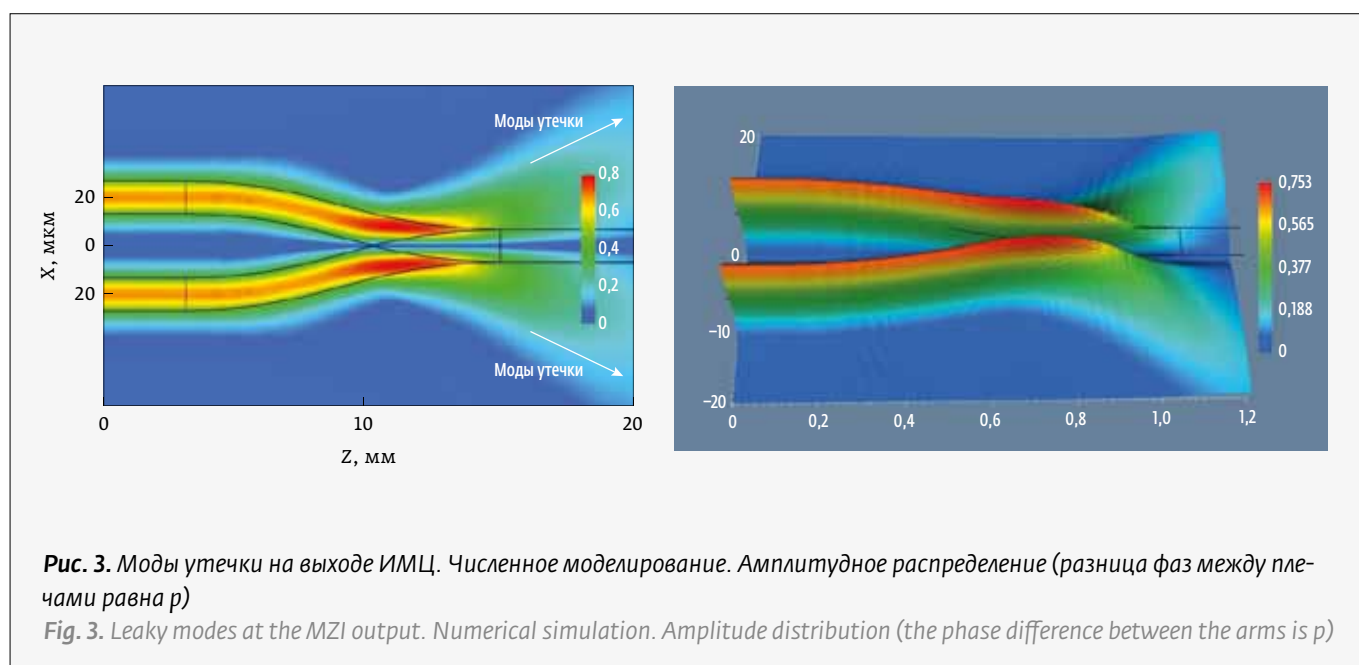
Нами были исследованы следующие устройства, архитектура которых схожа с архитектурой ИМЦ. Общим является то, что все эти устройства имеют заметно вытянутую форму: соотношение длины к ширине подложки может составлять 30 раз и более. Материал подложки – ниобат лития (LiNbO_3), волноводы изготовлены методом диффузии ионов титана.

2.1. Амплитудный модулятор на основе ИМЦ

Интегрально-оптический амплитудный модулятор на основе ИМЦ может быть рассмотрен как два встречно-включенных Y-каплера (см. рис. 2). Длина подложки L может составлять 50–60 мм, ширина подложки h может составлять 3–6 мм. Угол α составляет примерно 3° . Ниже рассматривается схема с одним входом и одним выходом. При приложении напряжения к паре электродов (2), можно менять величину разности фаз $\Delta\phi$ между двумя плечами интерферометра в диа-



to use the leaky modes as a solution to the wave equation. The leaky modes were discovered experimentally by Hall and Ye [12]. In this experiment, a three-layer ZnSe waveguide on a GaSe substrate was used where only tunnelling modes can theoretically exist. During the experiment, the photographs of TE and TM modes were obtained for the substrates with various thicknesses. Further, the behavior of leaky modes in the waveguides of various shapes was described by Snyder and Love [13]. They also demonstrated the solutions to the field propagation problems in a waveguide using the tunnelling modes. Thus, the leaky modes are a well-studied and theoretically described phenomenon with an experimental confirmation.



пазоне от 0 до π . На вход устройства на рабочей длине волны подается оптическая мощность $I_{\text{вх}}$. Если $\Delta\varphi=0$, то мощность на выходе $I_{\text{вых}}=I_{\text{вх}}$. Если $\Delta\varphi=\pi$, то мощность на выходе $I_{\text{вых}}=0$. В этом случае мощность рассеивается в подложку. Это рассеяние происходит по модам утечки.

Нами был проведен численный расчет и анализ мод утечки для рассматриваемого здесь устройства. На рис. 3 приведен характерный пример амплитудного распределения моды утечки для выходного Y-каплера для случая $\Delta\varphi=\pi$. Видно, что в этом случае распространяющаяся по плечам интерферометра мощность не попадает в выходной волновод, а полностью уходит в подложку по двум симметричным модам утечки, и в дальнейшем падает на заднюю грань подложки. Угол между осью волновода и направлением моды утечки, по которому распространяется максимальная мощность составляет от 1° до 2° . Принимая во внимание величину показателя преломления ниобата лития $n \approx 2,17$ на длине волны из диапазона 1520–1560 нм, можно оценить величину Френелевского амплитудного коэффициента отражения r , определяемого разностью показателей преломления при угле падения, близком к нормальному:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \approx 0,37. \quad (1)$$

Здесь n_1 – показатель преломления ниобата лития, n_2 – показатель преломления воздуха. Тогда величину отраженной обратно в подложку мощности можно оценить примерно в 14% от мощности на входе модулятора.

На рис. 4 показан пример моделирования процесса распространения обратно-отраженной мощности от задней грани подложки с учетом величины угла $\alpha=2,7^\circ$. Это распределение имеет зигзагообразный характер с перемежающимися максимумами и минимумами.

Окончательное распределение оптической мощности на входной грани модулятора зависит от точного соотношения длины и ширины конкретного устройства и поэтому не может быть определено с высокой точностью. Для нас более важным является факт, что в результате фазовой модуляции в одном из плеч ИМЦ возникает неконтролируемое распространение оптической мощности в подложке модулятора, ее величина может достигать 14% от мощности, поступающей на вход. Очевидно, что часть этой мощности может снова поступать в волноводы, например через моды утечки входного Y-каплера. Это приводит к уве-

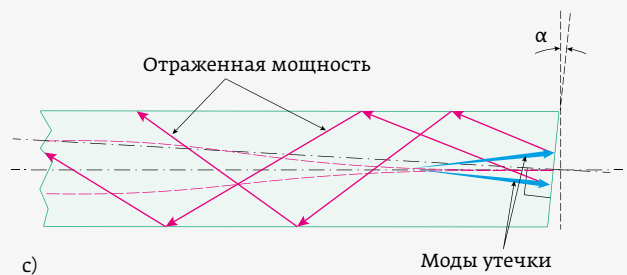
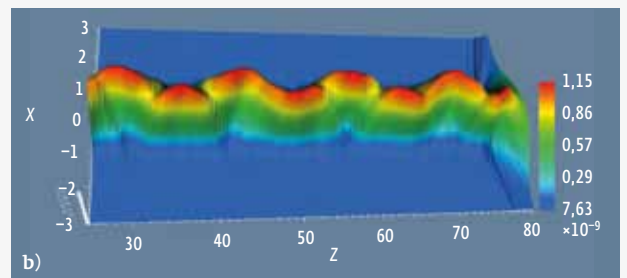
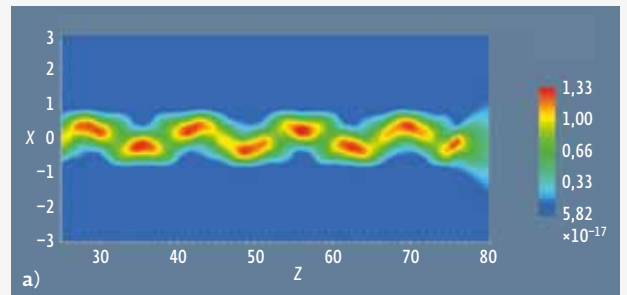


Рис. 4. Распределение отраженной от задней грани мощности света, проникшего в подложку по модам утечки (отраженная мощность распространяется справа налево); на элементах рисунка а) и б) отношение длина-высота отличаются от аналогичного отношения на элементе рисунка с)

Fig. 4. Distribution of the light power reflected from the back face and penetrating into the substrate through the leaky modes (the reflected power propagates from right to left); in figures a) and b) the length-to-height ratio differs from that provided in figure c)

When performing numerous works for assembly and adjustment of various integrated-optical interferometers, we were also able to repeatedly and directly observe the “output” of optical power from the MZI in the directions determined by the leaky modes.

In this paper, we provide the simulation results of leaky modes in the electrically controlled integrated-optical MZIs made on the surface of a lithium niobate (LiNbO_3) crystal substrate.

личению шумов на выходе ИМЦ, и, в конечном итоге, к уменьшению динамического диапазона, что и наблюдается на практике.

2.2. Квантовый генератор шума на основе ИМЦ

Работа такого устройства описана нами в [1, 2]. Здесь мы рассмотрим, как вакуумные флуктуации проникают в схему квантового генератора шума. Две принципиальные схемы квантового генератора шума приведены на рис. 5. На рис. 5а показана симметричная схема (два входа и два выхода). В такой схеме выполняется условие унитарности преобразования, моды утечки отсутствуют, а вакуумные флуктуации поступают в схему через второй, открытый, вход.

Вторая схема (рис. 5б) является несимметричной (один вход и два выхода). Моды утечки возникают вследствие необходимости выполнения унитарности преобразования. Вакуумные флук-

2. SIMULATION RESULTS

We have studied the following devices, the architecture of which is similar to the MZI architecture. The common property is that all these devices have a noticeably prolate shape: the length-to-width ratio of the substrate can be 30 times or more. The substrate material is lithium niobate (LiNbO_3), the waveguides are made using the titanium ion diffusion method.

2.1. MZI-based amplitude modulator

The MZI-based integrated-optical amplitude modulator can be considered as two back-to-back Y-couplers (see Fig. 2). The substrate length L can be 50–60 mm, the substrate width h can be 3–6 mm. The angle α is about 3° . The circuit with one input and one output is considered below. When the voltage is applied to a pair of electrodes (2), it is possible to change the phase difference value $\Delta\varphi$ between the two interferometer arms in the range $0-\pi$. The optical power I_{in} is supplied to the device input at the operating wave-

length. If $\Delta\varphi=0$, then the output power $I_{\text{out}}=I_{\text{in}}$. If $\Delta\varphi=\pi$, then the output power $I_{\text{out}}=0$. In this case, the power is dissipated into the substrate. This dissipation occurs using the tunnelling modes.

We have performed a numerical calculation and analysis of the leaky modes for the device considered in this paper. Figure 3 shows a typical example of the amplitude distribution of the tunnelling mode for the output Y-coupler for the $\Delta\varphi=\pi$ case. It can be seen that in this case, the power propagating along the interferometer arms does not enter the output waveguide, but is completely fed to the substrate along two symmetric tunnelling modes. It further falls on the back face of the substrate. The angle between the waveguide axis and the tunnelling mode direction along which the maximum power is propagating is equal to $1^\circ-2^\circ$. Having considered the refractive index value of lithium niobate $n\approx 2,17$ at a wavelength from the range of 1520–1560 nm, it is possible to assess the value of the Fresnel amplitude reflection coefficient r , determined by the difference in the refractive indices at an incidence angle close to normal one:

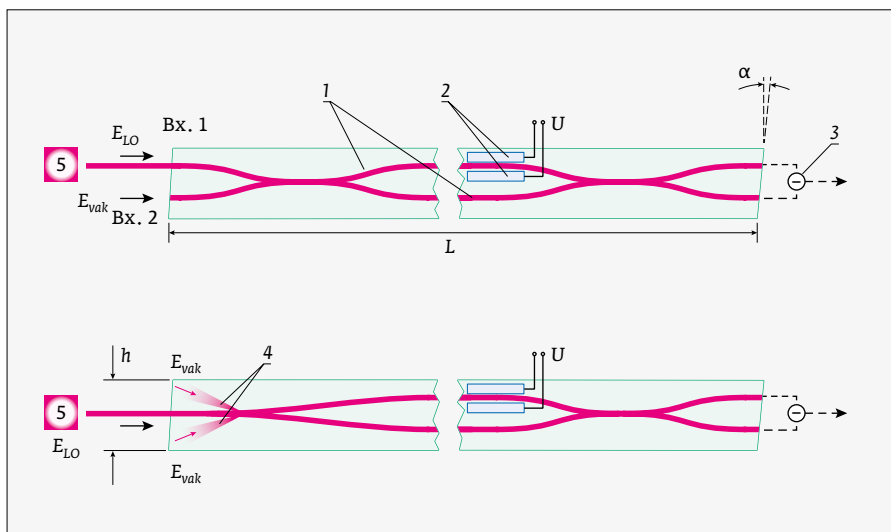


Рис. 5. Схемы квантового генератора шума, а): несимметричная схема, б): симметричная схема. 1 – оптические волноводы, образующие ИМЦ, 2 – управляющие электроды, 3 – балансный детектор, 4 – пути проникновения в схему генератора вакуумных флуктуаций, 5 – локальный осциллятор. (В случае б) вакуумные флуктуации проникают в схему через моды утечки. Локальный осциллятор соединен со схемой оптическим волокном (волновод): вакуумные флуктуации не могут проникать в схему таким путем)
Fig. 5. Quantum noise generator circuits: a) – asymmetric circuit, b) – symmetrical circuit (1 – optical waveguides forming the MZI, 2 – control electrodes, 3 – balance detector, 4 – penetration paths into the vacuum fluctuation generator circuit, 5 – local oscillator). In the b) case the vacuum fluctuations enter the circuit through the leaky modes. The local oscillator is connected to the circuit by an optical fiber (waveguide): the vacuum fluctuations cannot penetrate the circuit in this way

туации поступают в нее через моды утечки входного Y-каплера.

На рис. 6 показан пример численного моделирования фазового распределения поля вакуумных флуктуаций E_{vak} через моды утечки на входе несимметричной схемы. Поле локального осциллятора E_{LO} поступает в генератор шума через входной волновод. Отметим, что именно возможность проникновения вакуумных флуктуаций в волновод через подложку обеспечивает функционирование квантовых генераторов шума, построенных по этой схеме.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Динамический диапазон амплитудного модулятора определяется «снизу» – уровнем шумов, «сверху» – уровнем сигнала, при котором появляются высшие гармоники [5]. В данной работе мы рассматриваем влияние шумов. В работе [3] приведены экспериментальные данные, из которых следует, что экспериментально измеренный динамический диапазон составил не более 70–80 дБ, что значительно меньше теоретических оценок, согласно которым теоретический предел составляет порядка 130 дБ [5]. Здесь следует учесть, что на практике фактически происходит измерение динамического диапазона всей системы лазер-модулятор-фотоприемник. Каждый из этих элементов вносит свой вклад в уровень шумов. Кроме того, важным фактором является согласование всех элементов тракта по уровню собственных шумов. Поэтому шумы, возникающие в результате появления мод утечки, являются только одними из шумов, вносящих

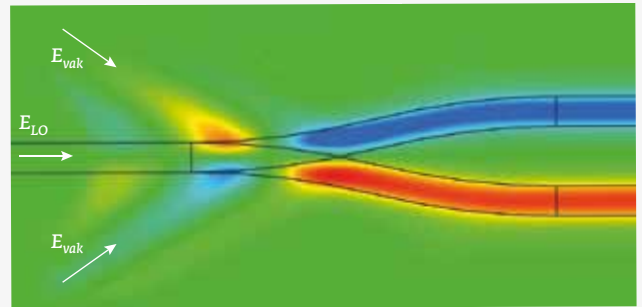


Рис. 6. Поступление поля вакуумных флуктуаций через моды утечки на входе несимметричной схемы. Фазовое распределение

Fig. 6. Entry of the vacuum fluctuation field through the leaky modes at the input of an asymmetric circuit. Phase distribution

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \approx 0,37, \quad (1)$$

where n_1 is the refractive index of lithium niobate, n_2 is the refractive index of air. Then the power reflected back into the substrate can be estimated at about 14% of the modulator input power.

Figure 4 shows an example of the propagation process simulation for the backward-reflected power from the back face of the substrate, with due regard to the angle $\alpha = 2.7^\circ$. This distribution is performed in zigzag fashion with the alternating peaks and bases.

The final optical power distribution at the input face of the modulator depends on the exact length-to-width ratio of a particular device and therefore cannot

Промышленные высокочастотные плазменные системы

Проектирование и производство

ВЧ -Ионных источников
-Генераторов плазмы
-Генераторов мощности
-Согласующих устройств





вклад в потери динамического диапазона. Тем не менее, их необходимо учитывать и по возможности минимизировать.

Для амплитудных модуляторов на основе ИМЦ моды утечки носят паразитный характер. Они создают неконтролируемый оптический шум в подложке, который в конечном итоге приводит к уменьшению динамического диапазона модулятора. Здесь в качестве превентивной меры можно предложить наносить на торцевые грани подложки антиотражающее покрытие, что должно уменьшить обратное отражение оптической мощности; а на обратную сторону подложки – наносить поглощающее покрытие, что должно уменьшить мощность, распространяющуюся в подложке.

Другой, не менее серьезной проблемой, связанной с наличием мод утечек, является возможность осуществления атаки на квантовую линию связи, в которой используются как фазовые, так и амплитудные модуляторы (рис. 6). Оптическая мощность, рассеиваемая через моды утечки, абсолютно синхронизована с тактами амплитудной модуляции, используемой в линии. Можно предположить, что некоторая часть рассеиваемой мощности может быть обнаружена нарушителем в линии квантовой связи на заметном расстоянии от модулятора. Учитывая, что величина рассеиваемой мощности может достигать 14% ($\approx -8,54$ дБ) от входной мощности, такой сценарий представляется вполне реалистичным. Здесь помимо задачи снижения оптической мощности, выходящей по модам утечки при амплитудной модуляции, возникает задача использования типа кодирования (или модуляции), наиболее энергетически выгодной. При «обычной» амплитудной модуляции часть передаваемой мощности рассеивается в подложку.

Для квантового генератора шума, выполненного по несимметричной схеме, наличие мод утечки обеспечивает поступление в схему поля вакуумных флуктуаций. В этом случае актуальной является задача поиска такого амплитудно-фазового распределения моды, которое обеспечило бы поступление максимальной мощности вакуумных флуктуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты моделирования мод утечки в электрически-управляемых интегрально-оптических ИМЦ, созданных на поверхности подложки из кристалла ниобат лития (LiNbO_3). Показано, что для амплитудных модуляторов

be determined with high accuracy. More important for us is the fact that an uncontrolled optical power propagation occurs in the modulator substrate as a result of phase modulation in one of the MZI arms that can reach 14% of the input power. Obviously, part of this power can again enter the waveguides, for example, through the leaky modes of the input Y-coupler. This leads to a noise level increase at the MZI output, and, ultimately, to a decrease in the dynamic range that is observed in the field.

2.2. MZI-based quantum noise generator

The operating principle of such a device is described by us in [1, 2]. In this paper we consider how the vacuum fluctuations penetrate the quantum noise generator circuit. Two flow charts of the quantum noise generator are shown in Fig. 5. Fig. 5a shows a symmetrical circuit (two inputs and two outputs). In such a circuit, the condition for the transformation unitarity is met, there are no leaky modes, and the vacuum fluctuations enter the circuit through the second open input.

The second flow chart (Fig. 5b) is asymmetrical (one input and two outputs). The leaky modes occur due to the need to comply with the transformation unitarity condition. The vacuum fluctuations enter it through the leaky modes of the input Y-coupler.

Figure 6 shows an example of numerical simulation for the phase distribution of the vacuum fluctuation field E_{vak} through the leaky modes at the asymmetrical circuit input. The local oscillator field E_{LO} enters the noise generator through the input waveguide. It should be noted that it is the possibility of vacuum fluctuations penetrating into the waveguide through the substrate that ensures operation of the quantum noise generators made according to this chart.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The dynamic range of the amplitude modulator is determined “from below” by the noise level, and “from above” by the signal strength at which the higher harmonics occur [5]. In this paper, we consider the noise impact. The paper [3] provides the experimental data. It follows that the experimentally measured dynamic range is no more than 70–80 dB that is much less than the theoretical estimates, according to which the theoretical threshold is about 130 dB [5]. In this case, it should be considered that in fact, the dynamic range of the entire laser-modulator-photodetector system is measured in practice. Each of these elements contributes to the noise level. In addition, an important factor is coordination of all path elements in terms of the inherent noise level. Therefore, the noise resulting from the leaky modes is only one of noises contribut-

на основе ИМЦ моды утечки носят паразитный характер, и рассеяние оптической мощности через моды утечек приводит к уменьшению динамического диапазона амплитудного модулятора. Появление мод утечек повышает вероятность осуществления атаки на квантовую линию связи, в которой используются и фазовые, и амплитудные модуляторы.

REFERENCES

1. **Petrov V. M., Shamray A. V., Ilyichev I. V., Agruzov P. M., Lebedev V. V.** Broadband Quantum Noise Generator Based on a Controlled Integral Optical Interferometer. *Photonics Russia*. 2021; 15(1): 70–75. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.70.75.
2. **Lebedev V. V., Petrov V. M., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Shamray A. V.** Istochnik kvantovogo shuma na osnove detektirovaniya drobovogo shuma balansnogo fotopriyomnika s upravlyаемым integral'no-opticheskim svetodelitelem. *Technical Physics Letters*. 2021; 47(21): 10–12. DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51620.18870.
Лебедев В. В., Петров В. М., Ильичев И. В., Агрозов П. М., Шамрай А. В. Источник квантового шума на основе детектирования дробового шума балансного фотоприемника с управляемым интегрально-оптическим светоделителем. *Письма в ЖТФ*. 2021; 47(21): 10–12. DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51620.18870.
3. **Petrov V. M., Shamray A. V., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Lebedev V. V., Gerasimenko N. D., Gerasimenko V. S.** National Microwave Integrated Optical Modulators for Quantum Communications. *Photonics Russia*. 2020; 14(5): 414–423. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423.
4. **Wang J., Sciarrino F. et al.** Integrated photonic quantum technologies. ing to the loss of dynamic range. However, they must be considered and, if possible, minimized.

The leaky modes are of parasitic nature for the MZI-based amplitude modulators. They create practically uncontrolled optical noise in the substrate that ultimately reduces the dynamic range of the modulator. In this case, it is possible to propose application of an antireflection coating to the end faces of the substrate as a preventive measure that should reduce the backward reflection of the optical power. The back side of the substrate should be covered by an absorbing coating to reduce the power propagation in the substrate.

Another problem that is no less serious and related to the availability of leaky modes is the possible attack on a quantum communication line that uses both phase and amplitude modulators (Fig. 6). The optical power dissipated through the tunnelling modes is absolutely synchronized with the AM strokes used on the line. It can be assumed that some part of the dissipated power can be detected by an intruder in a quantum communication line at a noticeable distance from the modulator. Having considered that the power dissipation can reach 14% (≈ -8.54 dB) of the input power, this scenario seems quite realistic. In this case,

ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»

БЕЛОМО
ММЗ ВАВИЛОВА

Оптический завод «Сфера»

«Оптический завод «Сфера» основан в 1994 году как филиал ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга БелОМО» для производства оптических элементов. В настоящее время завод выпускает большое количество оптических элементов различной сложности по чертежам Заказчика. Оптические элементы, произведенные «Оптическим заводом «Сфера», успешно применяются во многих уникальных оптоэлектронных системах.

Для производства высокотехнологичной продукции проводится техническое перевооружение производства, проводится модернизация производственных мощностей с целью увеличения объемов производства. Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям версии ГОСТ ISO 9001:2015.

Многолетний опыт производства оптических элементов, высококвалифицированный персонал предприятия позволяют удовлетворить любую потребность Заказчика.

Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325-52-91
Тел./факс: (+375 17) 276-27-71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by





- Nature Photonics*. 2020; 14: 273–284.
5. **Lebedev V. V., Petrov V. M., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., SHamray A. V.** Broadband integrated optical modulators: achievements and prospects. *Phys. Usp.* 2021; 64: 722–739. Лебедев В. В., Петров В. М., Ильичев И. В., Агрузов П. М., Шамрай А. В. Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития. *Успехи Физических Наук*. 2021; 191 (7): 760–782. DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038871.
 6. **Smith B. J., Kundis D. et al.** Phase-controlled integrated photonic quantum circuit. *Optics Express*. 2009; 17 (16): 13516–13525. DOI: 10.1364/OE.17.013516.
 7. **Saleh F. M., Giuseppe G. et al.** Modal and Polarisation Qubits in Ti:LiNbO₃ Photonic Circuits for a Universal Quantum Logic Gates. *Quantum and Photonics Technologies*. 2021. DOI: 10.1364/OE.18.020475.
 8. **Martin A., Alibart O. et al.** A quantum relay chip based on telecommunication integrated optics technology. *New Journal of Physics*. 2012; 13: 025002 (13 pp).
 9. **Marcuvitz N.** On field representations in terms of leaky modes or eigenmodes. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1956; 4: 192–194. DOI: 10.1109/TAP.1956.1144410.
 10. **Barone S.** Leaky wave contributions to the field of a line source above a dielectric slab. *Microwave Research Institute, Polytechnic Institute of Brooklyn*. 1956; Report R-532–546, PIB-462.
 11. **Barone S.** Leaky wave contributions to the field of a line source above a dielectric slab – part II. *Microwave Research Institute*. – Brooklyn: Polytechnic Institute of Brooklyn. 1958; Report R-698-58, PIB-626.
 12. **Hall D. B.** Leaky waves in a heteroepitaxial film. *J. Appl. Phys.* 1973; 44: 2271–2274. DOI: 10.1063/1.1662549.
 13. **Snyder A. W.** *Optical Waveguide Theory*. – Kluwer Academic. 1983. DOI: 10.1007/978-1-4613-2813-1.

ОБ АВТОРАХ:

Петров Виктор Михайлович, д. ф. - м. н. (радиофизика), д. ф. - м. н. (оптика), vmpetrov@itmo.ru, главный научный сотрудник, лаборатория Квантовой информатики, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0002-8523-0336

Герасименко Наталья Дмитриевна, инженер, Национальный исследовательский университет ИТМО, факультет фотоники и оптоинформатики, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0002-6039-9485

Герасименко Владислав Сергеевич, инженер, факультет фотоники и оптоинформатики, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0002-9709-3850

Коротеев Денис Александрович, студент, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. ORCID: 0000-0002-5489-4017

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Личный вклад Коротеева Д. А.: выбор программного обеспечения, проведение вычислений, моделирование, анализ полученных результатов.

Личный вклад Герасименко Н. С.: Сборка, настройка и тестирование экспериментальных образцов модуляторов.

Личный вклад Герасименко В. С.: обнаружение и визуальное наблюдение мод утечек.

Личный вклад Петрова В. М.: постановка задачи, анализ результатов, руководство работой.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании рукописи и согласовали текст в части своей работы.

in addition to the problem of reducing the optical power coming out through the tunnelling modes at an amplitude modulation, there is a problem of using the coding, or modulation type, that is the most energetically favorable. In the case of “normal” amplitude modulation, part of the transmitted power is dissipated into the substrate.

For a quantum noise generator made according to an asymmetric circuit, availability of leaky modes ensures that the field of vacuum fluctuations enters the circuit. In this case, the crucial task is to determine such an amplitude-phase mode distribution that would provide the maximum power of vacuum fluctuations.

CONCLUSION

The simulation results of leaky modes in the electrically controlled integrated-optical MZIs, made on the surface of the lithium niobate (LiNbO₃) crystal substrate, are presented. It is shown that the leaky modes are of parasitic nature for the MZI-based amplitude modulators, and the optical power dissipation through the leaky modes leads to a decrease in the dynamic range of the amplitude modulator. The occurrence of leaky modes increases the likelihood of an attack on a quantum communication line that uses both phase and amplitude modulators.

ABOUT AUTHORS

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

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

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

Koroteev Denis Aleksandrovich, student, National Research University ITMO, St.-Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0002-5489-4017

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

Koroteeva D. A. personal contribution: choice of software, calculations, modeling, analysis of the results.

Personal contribution of Gerasimenko N. S.: Assembly, tuning and testing of experimental models of modulators.

Personal contribution of Gerasimenko V. S.: detection and visual observation of leak modes.

Personal contribution of V. M. Petrov: setting the problem, analyzing the results, supervising the work.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.

21-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ



weldex

0+

11-14
ОКТАБРЯ

2022

РОССИЯ, МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО

Разделы выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Нанесение защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты
- Оборудование для обработки кромок



weldex.ru

Официальная поддержка:



Свяжитесь с Организатором, чтобы узнать об условиях участия: weldex@hyve.group | +7 (499) 750-08-28