



Интегрально-оптические C-NOT гейты: оценка основных параметров для практической реализации

В. М. Петров¹, Д. А. Коротеев², Д. А. Семисалов²,
В. С. Страшилин², Д. С. Хлусевич², М. И. Яковлев²,
М. В. Парфенов³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия

³ ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено влияние отклонения параметров светоделителей на работу квантового фотонного гейта в интегрально-оптическом исполнении. Показано, что требуемая точность вполне достижима для электро-оптического управления в геометрии X-делителя. Проведенные оценки длины устройства показывают возможность его реализации даже на подложках длиной 3 дюйма.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, фотонные гейты, C-NOT гейт, квантовый логический вентиль, вероятности успешного срабатывания

Статья получена: 25.12.2022

Статья принята: 25.01.2023

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание практически реализуемых, надежных, энергоэффективных квантовых компьютеров является актуальной задачей. Можно выделить следующие основные технологические платформы, которые используются для решения указанной задачи: ионы/атомы в электромагнитных ловушках, сверхпроводящие цепи, квантовые точки/примесные атомы, оптические (фотонные) интегральные схемы.

Integrated Optical C-NOT Gates: Estimation of the Main Parameters for Practical Design

V. M. Petrov¹, D. A. Koroteev², D. A. Semisalov², V. S. Strashilin²,
D. S. Khlusevich², M. I. Yakovlev², M. V. Parfenov³

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

² National Research University ITMO, Saint-Petersburg,
Russia

³ A. F. Ioffe Physical and Technical Institute, Saint-Petersburg,
Russia

The influence of deviation of the beam splitter parameters on the operation of a quantum photon gate in an integrated optical version is considered. It is shown that the required accuracy is quite achievable for electro-optical control in the X-splitter geometry. The estimated length of the device demonstrates its possible implementation even on the substrates with a length of 3 inches.

Keywords: photonic integrated circuits, photonic gates, C-NOT gate, quantum logic gate, success probabilities

Received: December 25, 2022

Accepted: January 25, 2023

INTRODUCTION

The development and production of the implementable, reliable, energy-efficient quantum computers is an urgent task. It is possible to determine the following main process platforms that are used to solve this problem: ions/atoms in the electromagnetic traps, superconducting circuits, quantum dots/impurity atoms, and optical (photonic) integrated circuits.

The quantum dual-mode photon gates (hereinafter referred to as the gates) ensure transformation of the quantum state of one photon depending on the state of another photon. In this sense, the role of quantum gates is very similar to the role of a semiconductor transistor in electronics, in which the charge-carrier flow is controlled by the flow of other charge carriers.



Квантовые двухмодовые фотонные гейты (далее – гейты) обеспечивают преобразование квантового состояния одного фотона в зависимости от состояния другого фотона. В этом смысле роль квантовых гейтов весьма схожа с ролью полупроводникового транзистора в электронике, в котором происходит управление потоком одних носителей заряда при помощи потока других носителей заряда. Гейт, обеспечивающий выполнение алгоритма управляемого «НЕ» (*примечание: англ. Controlled NOT gate – C-NOT гейт*), является одним из наиболее востребованных в современных задачах квантовых вычислений.

В данной работе мы рассмотрим аспекты проектирования фотонных гейтов на основе доступной отечественной элементной базы в интегрально-оптическом исполнении.

Можно выделить различные типы элементной базы, используемой для создания гейтов. Во-первых, т.н. объемное исполнение. В этом случае используются объемные, дискретные элементы: обычные светоделительные кубики [1-3] или, например, объемные акусто-оптические модуляторы в качестве управляемых светоделителей [4]. Другим типом является интегрально-оптическое исполнение, когда все устройство выполнено в виде интегрально-оптической структуры на одной подложке в виде единого чипа [5-8]. Мы остановили свой выбор на интегральном исполнении по следующей причине: это механическая стабильность по сравнению с объемным или волоконным исполнением, что является важным при создании интерферометров. Малый размер интерферометра, помимо монолитного, интегрально-оптического исполнения, позволяет с высокой точностью выровнять его плечи, что повышает его стабильность. Хорошо отработанная технология изготовления интегрально-оптических чипов уже позволила нам создать высокочувствительные датчики напряженности электрического поля [9], широкополосные СВЧ интегрально-оптические модуляторы [10], широкополосные источники квантового шума [11], генераторы оптических гребенок для систем квантовых коммуникаций [12].

Важным направлением исследования является материал подложки, на которой создается гейт. Активно используются ниобат лития LiNbO_3 [13, 14], высококачественное кварцевое стекло [8], структуры типа «кварц-допированный кремний» (англ.: «silica-on-silicon», «doped silica films»), т.н. «кремниевые волноводы» [15]. Активно идут исследова-

The gate that provides execution of the controlled NOT algorithm (*note: Controlled NOT gate – C-NOT gate*) is one of the most popular in the modern quantum computing problems.

In this paper, we will consider the design aspects of photonic gates based on the available domestic hardware components in an integrated optical version.

There are different types of hardware components used to produce the gates. First, it is the so-called 3D-version. In this case, the volumetric, discrete elements are used, for example, ordinary beam splitting cubes [1-3] or three-dimensional acoustic and optical modulators as the controlled beam splitters [4]. Another type is the integrated optical design, when the entire device is made in the form of an integrated optical structure on one substrate in the form of a single chip [5-8]. We have opted for an integral design for the following reason: it provides mechanical stability compared to the 3D or fiber options that is important when manufacturing the interferometers. In addition to the monolithic, integrated-optical design, the small size of interferometer makes it possible to align its arms with very high accuracy that leads to an increased stability. The well-proven production technology of integrated optical chips has already allowed us to develop the highly sensitive electric field intensity sensors [9], broadband microwave integrated optical modulators [10], broadband quantum noise sources [11], and optical comb generators for the quantum communication systems [12].

An important area of research is the substrate material on which the gate is produced. The most popular types include lithium niobate LiNbO_3 [13, 14], the high-quality quartz glass [8], the silica-on-silicon structures or doped silica films, that is the silicon-based waveguides [15]. The research works on the use of the $\text{A}_3\text{-B}_5$ type compounds [16] and polymers [17] are rather persistent and active.

In this paper, we have proposed a C-NOT gate circuit based on the integrated optical beam splitters and studied the influence of amplitude and phase errors of count-down ratios on the gate operation.

INTEGRATED OPTICAL GATE CIRCUIT

The main element of the gate is the beam splitter. In the field of integrated optics, a beam splitter can be implemented on the basis of various elements: X- or Y-couplers, Mach-Zehnder interferometers (MZIs). In this paper, we consider the case when the beam splitter is based on epy X-couplers. We have to note

тельские работы по использованию соединений типа A_3B_5 [16] и полимеров [17].

В данной работе нами предложена схема C-NOT гейта на основе интегрально-оптических светоделителей и исследовано влияние амплитудных и фазовых погрешностей коэффициентов деления на работу гейта.

СХЕМА ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ГЕЙТА

Основной элемент гейта – светоделитель. В интегральной оптике светоделитель может быть реализован на основе различных элементов: X-У-каплеров, интерферометров Маха-Цендера (ИМЦ). В данной работе мы рассмотрим случай, когда светоделитель выполнен на основе X-каплеров. Сразу отметим, что такая классификация является достаточно условной, т.к. два последовательно расположенных каплера могут быть рассмотрены как один ИМЦ.

CNOT-гейт является одним из основных квантовых логических вентилях, используемых в квантовых вычислениях. Главной особенностью данного гейта является инвертирование зависимых мод в случае, если значение управляющего кубита равно единице. Матрица операции управляемого «НЕ» (*Controllable-NOT*) имеет вид:

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Схема гейта [1] в интегрально-оптическом исполнении, обеспечивающего выполнение алгоритма (1), приведена на рис. 1.

Все элементы гейта расположены на подложке, выполненной из ниобата лития $LiNbO_3$, Z-срез. Рабочая длина волны гейта $\lambda=810$ нм. Такой выбор длины волны обусловлен доступностью источников запутанных пар фотонов состоящих из полупроводникового лазера $\lambda=405$ нм и нелинейного кристалла нелинейно-оптических кристаллов бета-бората бария, $\beta-BaB_2O_4$ (BBO), выполняющего параметрическую даун-конверсию на длину волны 810 нм. Волноводы A_{in} и F_{in} и A_{out} и F_{out} являются нерабочими. Схема содержит 5 светоделителей BS_1 - BS_5 . Светоделители BS_1 и BS_5 имеют коэффициенты деления 50:50, т.е. 1/2. Светоделители BS_2 - BS_4 имеют коэффициенты деления 1/3. Для этого случая на схеме дополнительно указано, в какой

that such classification is rather conditional, since two tandem couplers can be considered as one MZI.

The C-NOT gate is one of the main quantum logic gates used in the quantum computations. The main feature of this gate is the inversion of dependent modes, if the control qubit value is equal to one. The controllable-NOT operation matrix is as follows:

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

The gate circuit [1] in the integrated optical version ensuring the algorithm execution (1), is shown in Fig. 1.

All gate elements are located on a substrate made of lithium niobate $LiNbO_3$ with a Z-cut. The operating wavelength of the gate is $\lambda=810$ nm. Such wavelength selection is due to the availability of entangled photon pairs consisting of a semiconductor laser $\lambda=405$ nm and a nonlinear crystal of nonlinear optical crystals of barium beta-borate, $\beta-BaB_2O_4$ (BBO), performing the parametric down-conversion at a wavelength of 810 nm. The waveguides A_{in} and F_{in} and A_{out} and F_{out} are inactive. The circuit contains 5 beam splitters BS_1 - BS_5 . The beam splitters BS_1 and BS_5 have the count-down ratios of 50:50, i.e. 1/2. The beam splitters BS_2 - BS_4 have the count-down ratios of 1/3. For this case, the circuit additionally indicates which channel receives 33.33...% of the incident power, and which channel receives 66.66...%.

IMPACT ASSESSMENT OF NON-IDEAL COUNT-DOWN RATIOS

The gate operation is significantly affected by deviation of the count-down ratio values from the given ones. The accuracy with which the beam splitter divides the photon flux significantly affects the most important specifications of the gate, namely the *fidelity* and *probability*. Even a minimal deviation from the required value of any of the count-down ratios leads to the loss of gate performance.

The *QuTiP* computational physics software library [18] has been used to simulate and study various specifications of a quantum optical system. Based on the *KLM* protocol, each qubit is represented as two optical modes, which provide for a photon with vertical or horizontal polarization depending on the mode.

канал поступает 33,33... % падающей мощности, а в какой – 66,66... %.

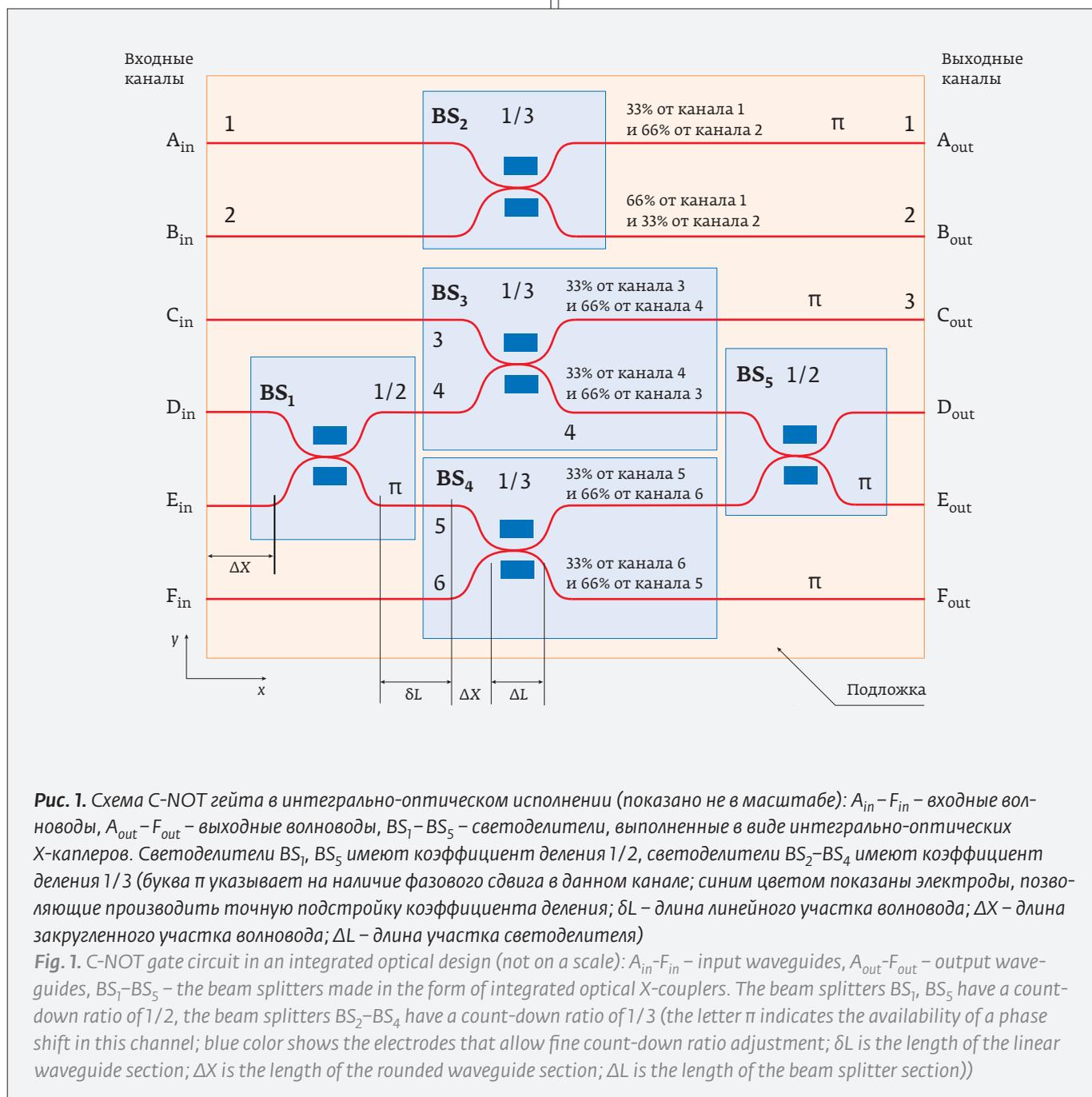
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕАЛЬНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕЛЕНИЯ

На работу гейта существенное влияние оказывает отклонение величин коэффициентов деления от заданных. Точность, с которой светоделитель производит деление потока фотонов, в значительной мере влияет на важнейшие характеристики гейта: верность выполнения операции и вероят-

Having used the formal description of the Fock states, it is possible to describe one mode condition through the matrix representation:

$$|0\rangle_H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle_V = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |2\rangle_{VV, VH, HH} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

The state of two modes in the two-channel encoding protocol is a computational qubit and is recorded as follows:





ность успешного срабатывания. Даже минимальное отклонение от требуемой величины любого из коэффициентов деления приводит к потере работоспособности гейта.

Для моделирования и изучения различных характеристик квантовой оптической системы использовалась программная библиотека вычислительной физики QuTiP [18]. Основываясь на протоколе KLM, каждый кубит представляется в виде двух оптических мод, в которых в зависимости от моды задавался фотон с вертикальной или горизонтальной поляризацией.

Используя формализм, описывающий состояния Фока, можно описать состояние одной моды через матричное представление:

$$|0\rangle_H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle_V = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |2\rangle_{VV, VH, HH} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Состояние двух мод в протоколе двухканального кодирования является вычислительным кубитом и записывается следующим образом:

$$|0\rangle \equiv |0, 1\rangle_{VH} = |0\rangle_V \otimes |1\rangle_H, \quad (3, a)$$

$$|1\rangle \equiv |1, 0\rangle_{VH} = |1\rangle_V \otimes |0\rangle_H. \quad (3, б)$$

Воздействие светоделителя на состояние системы из двух независимых мод a и b можно представить в виде суммы функций Гамильтона:

$$H = H_0 + H_{BS}, \quad (4, a)$$

$$H_0 = \frac{\hbar}{2}(a^\dagger a + b^\dagger b), \quad (4, б)$$

$$H_0 = \frac{\hbar}{2}(a^\dagger a + b^\dagger b), \quad (4, в)$$

где φ – разность фаз между прошедшим и отразившимся пучком. В свою очередь систему можно представить в виде унитарного оператора:

$$U = e^{-i\theta \frac{H}{\hbar}} = e^{-i\theta \frac{(H_0 + H_{BS})}{\hbar}} = U_{BS} U_0, \quad (5)$$

где θ – угол, определяющий, какая часть пучка пройдет или отразится:

$$r_{ref} = \sin^2 \theta, \quad t_{tr} = 1 - r_{ref}. \quad (6)$$

Применение оператора светоделителя на состояние системы приводит к достаточно точному описанию физического воздействия пучка прошедшего через него. Стоит отметить, что при расчете

$$|0\rangle \equiv |0, 1\rangle_{VH} = |0\rangle_V \otimes |1\rangle_H, \quad (3, a)$$

$$|1\rangle \equiv |1, 0\rangle_{VH} = |1\rangle_V \otimes |0\rangle_H. \quad (3, б)$$

The impact of a beam splitter on the state of a system consisting of two independent modes α and b can be represented as a sum of Hamiltonian functions:

$$H = H_0 + H_{BS}, \quad (4, a)$$

$$H_0 = \frac{\hbar}{2}(a^\dagger a + b^\dagger b), \quad (4, б)$$

$$H_0 = \frac{\hbar}{2}(a^\dagger a + b^\dagger b), \quad (4, в)$$

where φ is the phase difference between the transmitted and reflected beams. In turn, the system can be represented as a unitary operator:

$$U = e^{-i\theta \frac{H}{\hbar}} = e^{-i\theta \frac{(H_0 + H_{BS})}{\hbar}} = U_{BS} U_0, \quad (5)$$

where θ is an angle determining the beam part to be transmitted or reflected:

$$r_{ref} = \sin^2 \theta, \quad t_{tr} = 1 - r_{ref}. \quad (6)$$

Application of the beam splitter operator to the system state leads to a fairly accurate description of the physical impact of the transmitted beam. It should be noted that such calculation does not consider the time component, since the system is not changed over time, and the photons achieve the beam splitter simultaneously to an approximation of a fraction of their coherence length.

The gate circuit (Fig. 1) used in this paper is based on a two-channel encoding protocol. In the given circuit of tandem beam splitters, the B_{in} and C_{in} channels are the control modes c_H and c_V , the D_{in} and E_{in} channels are the dependent modes t_H and t_V , the A_{in} and F_{in} channels are the unoccupied auxiliary modes v_c and v_t .

We have considered the case when the input system state $|0, 0, 1, 0, 1, 0\rangle$ is affected by the beam splitters with a slight deviation from the theoretical model. Therefore, we can get the following probability distribution of the output states.

To describe the effects occurred when the parameters of dual-mode beam splitters deviate from the given values, we have simulated the system with due regard to the possible deviations in the reflection coefficient and phase affecting the initial system state.



не учитывается временная составляющая – система не изменяется с течением времени, а фотоны поступают на светоделитель одновременно, с точностью до доли длины их когерентности.

Схема гейта (рис. 1), используемая в данной работе, построена на протоколе двухканального кодирования. На представленной схеме последовательно расположенных светоделителей каналы V_{in} и C_{in} являются контролирующими модами c_H и c_V , каналы D_{in} и E_{in} зависимые моды t_H и t_V , каналы A_{in} и F_{in} – незанятые вспомогательные моды v_H и v_V .

Нами рассмотрен случай, при котором на входное состояние системы $|0, 0, 1, 0, 1, 0\rangle$ воздействуют светоделители с незначительным отклонением от теоретического представления. Отсюда мы можем получить следующее вероятностное распределение выходных состояний.

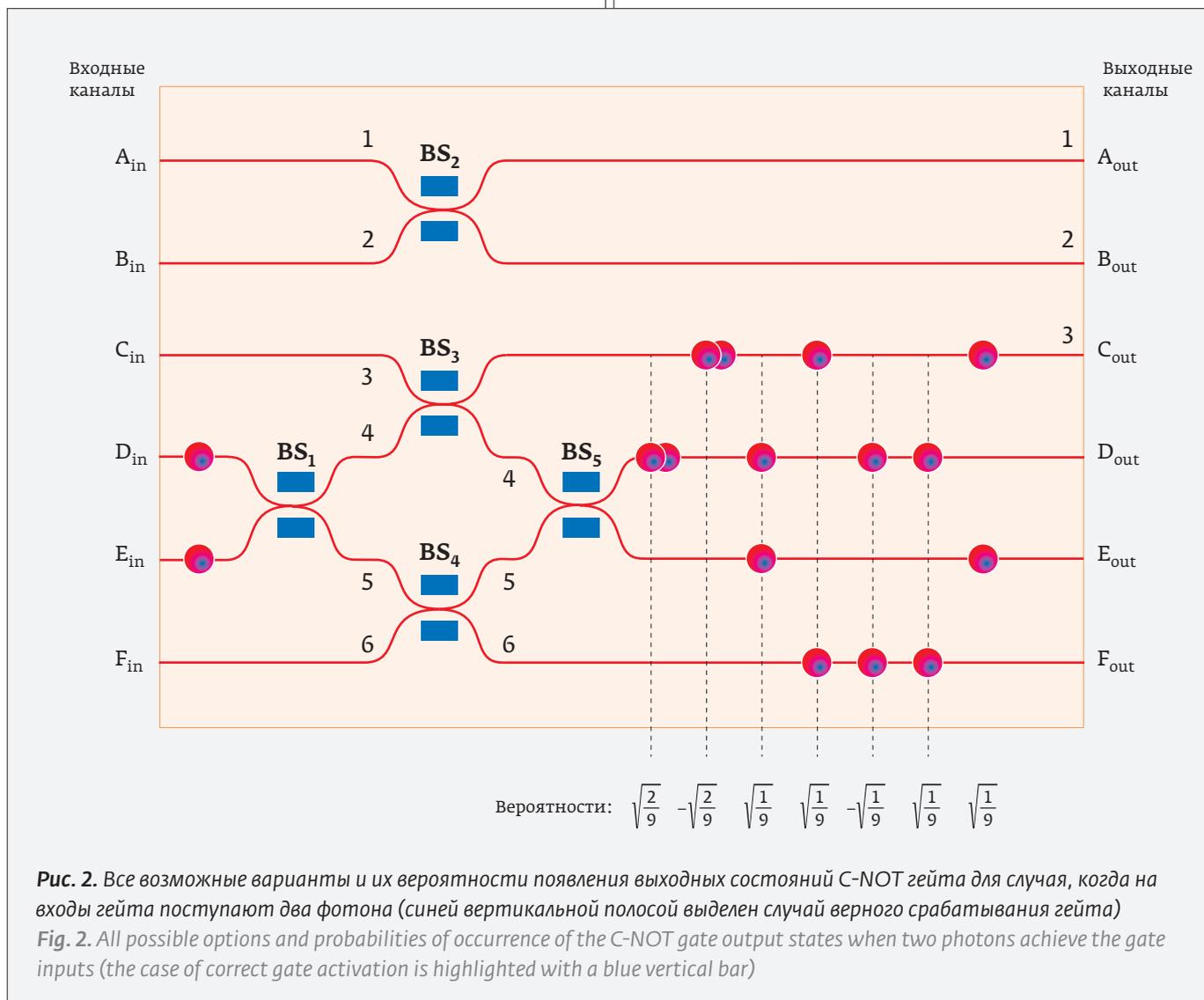
The unitary matrix describing the beam splitter is as follows [19]:

$$U(B_{(\theta, \varphi)}) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -e^{i\varphi} \sin \theta \\ e^{-i\varphi} \sin \theta & \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

In this case, θ is an angle given by the reflection and transmission coefficients, and φ is a change in the phase component (see (4), (6)). Thus, any change in these physical variables will occur according to the cosinusoidal/sinusoidal law and on an exponential basis.

a). Impact on a State With a Photon in One Mode

We will consider the beam splitters BS_1 and BS_5 with a count-down ratio of 1/2. We will consider the state as an input state described by two optical channels.



Для описания эффектов, возникающих при отклонении параметров двухмодовых светоделителей от заданных величин, нами было проведено моделирование системы с учетом возможных отклонений по коэффициенту отражения и по фазе, воздействующие на исходное состояние системы.

Унитарная матрица, описывающая светоделитель, выглядит следующим образом [19]:

$$U(B_{(\theta, \varphi)}) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -e^{i\varphi} \sin \theta \\ e^{-i\varphi} \sin \theta & \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Здесь θ – угол задаваемый коэффициентами отражения и пропускания, а φ – изменение фазовой составляющей (см. (4), (6)). Таким образом, изменение данных физических переменных будет происходить по косинусоидальному/синусоидальному закону и экспоненциально.

а). Воздействие на состояние с фотоном в одной моде

Рассмотрим светоделители BS_1 и BS_5 с коэффициентом деления 1/2. В качестве входного состояния, описываемого двумя оптическими каналами рассмотрим состояние.

Из приведенных графиков (рис. 3) видно, что изменение коэффициента деления светоделителя 50/50 приводит к отклонению вероятности нахождения системы в одном из выходных состояний или. При этом 50%-ая вероятность достигается при незначимом отклонение от теоретического представления, а само отклонение при исследуемом масштабе практически линейно. Отклонение фазовой составляющей незначительно влияет на систему с фотоном в одной моде и близится к необходимому распределению при относительно небольших отклонениях.

Далее рассмотрим светоделители BS_2 - BS_4 с коэффициентом деления 1/3.

Как видно из приведенного графика (рис. 4), изменение коэффициента отражения/пропускания светоделителя 33/66 также приводит к отклонению вероятности нахождения системы в одном из выходных состояний или. При этом отклонение от теоретического представления увеличивает вероятность нахождения того или иного состояния.

На рис. 5 приведены графики зависимостей вероятности нахождения заданного состояния для тех же светоделителей от отклонения φ от заданной величины.

As can be seen in the graphs (Fig. 3), any change in the beam splitter count-down ratio of 50/50 leads to a deviation in the probability of the system location in one of the output states or. In this case, a 50% probability is achieved with an insignificant deviation from the theoretical model, and the deviation is almost linear on a scale under study. The phase component deviation has insignificant impact on the system with a photon in one mode and approaches the required distribution with the relatively small deviations.

Next, we will consider the beam splitters BS_2 - BS_4 with a count-down ratio of 1/3.

As can be seen in the graph (Fig. 4), any change in the reflection/transmission coefficient of the beam splitter 33/66 also leads to a deviation in the probability of the system location in one of the output states or.

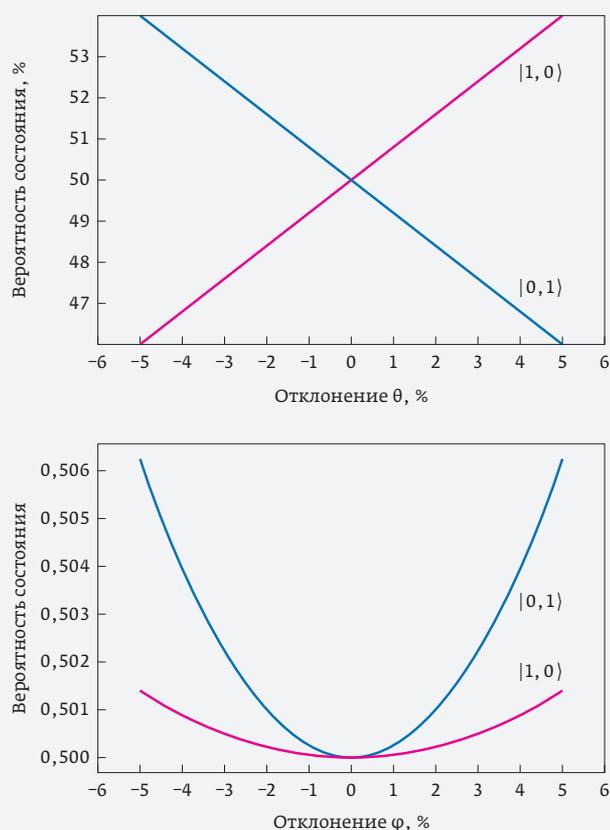


Рис. 3. Графики зависимостей вероятности нахождения заданного состояния на выходе светоделителя 1/2 от отклонения θ и φ от заданной величины

Fig. 3. Graphs of dependences of the given state probability at the output of the beam splitter 1/2 on the deviation θ and φ from the given value

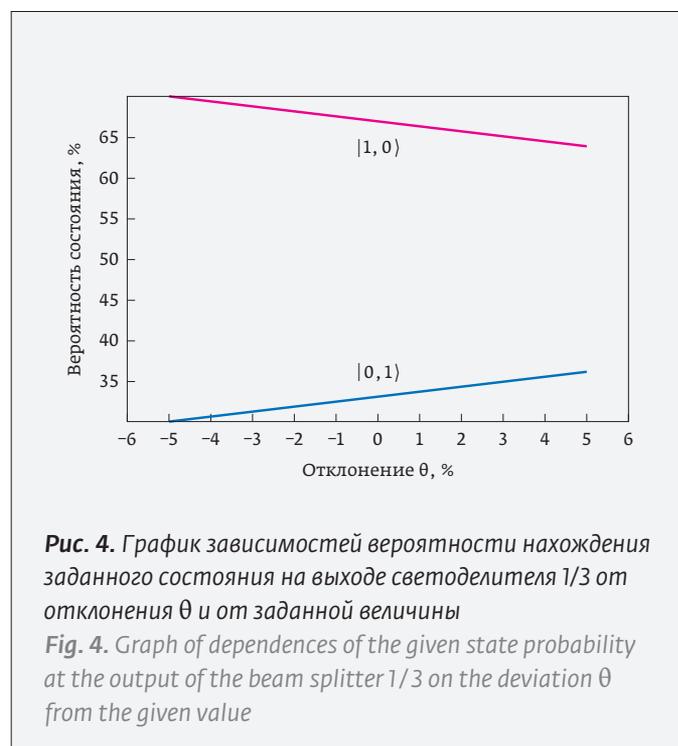
Видно, что отклонение фазовой составляющей, как и в случае с светоделителем 50/50, незначительно влияет на систему с фотоном в одной моде и при его уменьшении приводит систему к теоретическому распределению.

б). Воздействие на состояние с фотоном в двух модах или с суперпозицией горизонтальной и фазовой составляющих

Теперь в качестве входного состояния, описываемого двумя оптическими каналами, рассмотрим состояние.

Рассмотрим светоделители BS_1 и BS_5 с коэффициентом деления 1/2 (рис. 6, 7). Изменение коэффициента отражения/пропускания светоделителя 50/50, приводит к отклонению вероятности нахождения системы в состояниях системы $|0, 2\rangle$ и $|2, 0\rangle$ и появлению дополнительного состояния $|1, 1\rangle$. При этом при увеличении отклонения от теоретического перестает наблюдаться эффект Хонг-Оу-Манделя [19], при котором два попадающих на светоделитель 50/50 фотона выходят через одну моду, так как увеличивается вероятность состояния $|1, 1\rangle$.

Теперь рассмотрим светоделители BS_2 - BS_4 с коэффициентом деления 1/3 (рис. 8, 9). Из графика (рис. 8) видно, что изменение коэффициента отражения/пропускания светоделителя 1/3, напротив, при определенных условиях при-



In this case, the deviation from the theoretical model increases the probability of one or another state.

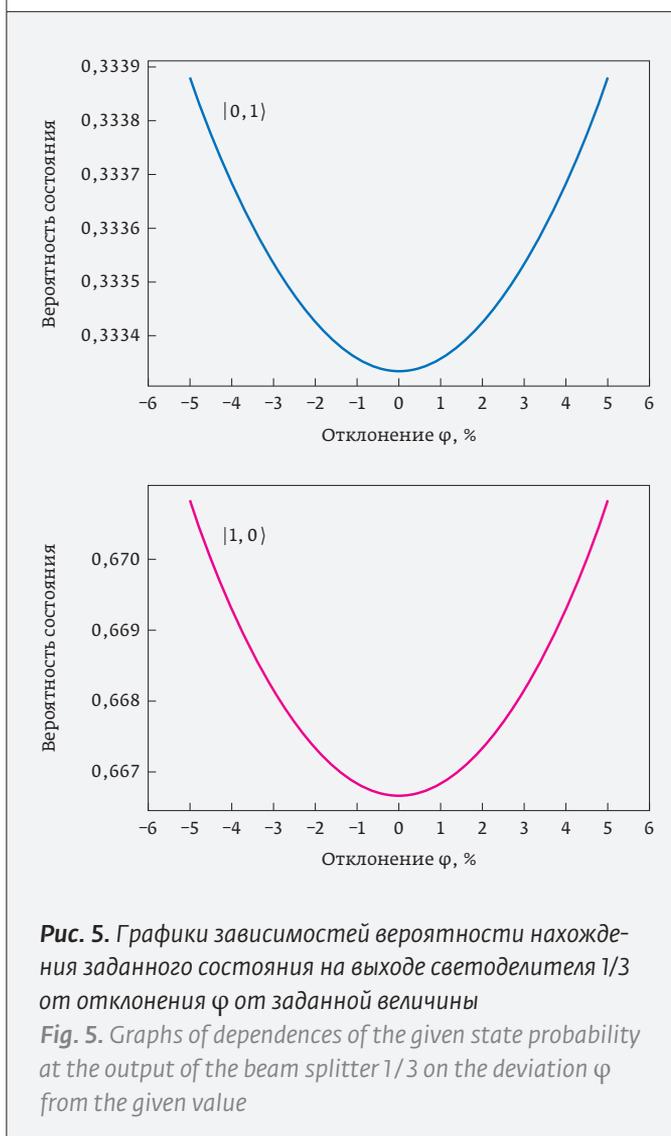
Figure 5 shows the dependences diagrams of the probability of a given state for the same beam splitters and deviation φ from the given value.

It can be seen that the phase component deviation, as in the case of the 50/50 beam splitter, has insignificant impact on the system with a photon in one mode and upon decrease, leads the system to the theoretical distribution.

б). Impact on a State With a Photon in Two Modes or with a Superposition of the Horizontal and Phase Components

Now, we will consider the state as an input state described by two optical channels.

Let us consider the beam splitters BS_1 and BS_5 with a count-down ratio of 1/2 (Fig. 6, 7). Changes in



ближает его к значениям светоделителя 1/2, что уменьшает вероятность нахождения системы в состоянии $|1, 1\rangle$.

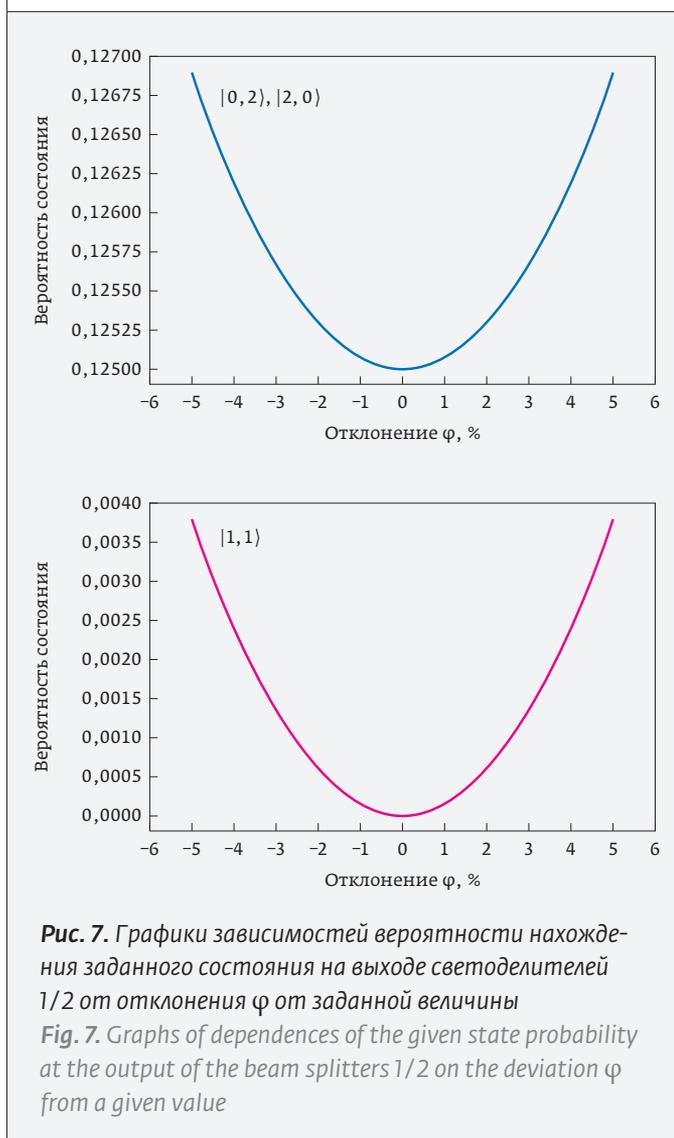
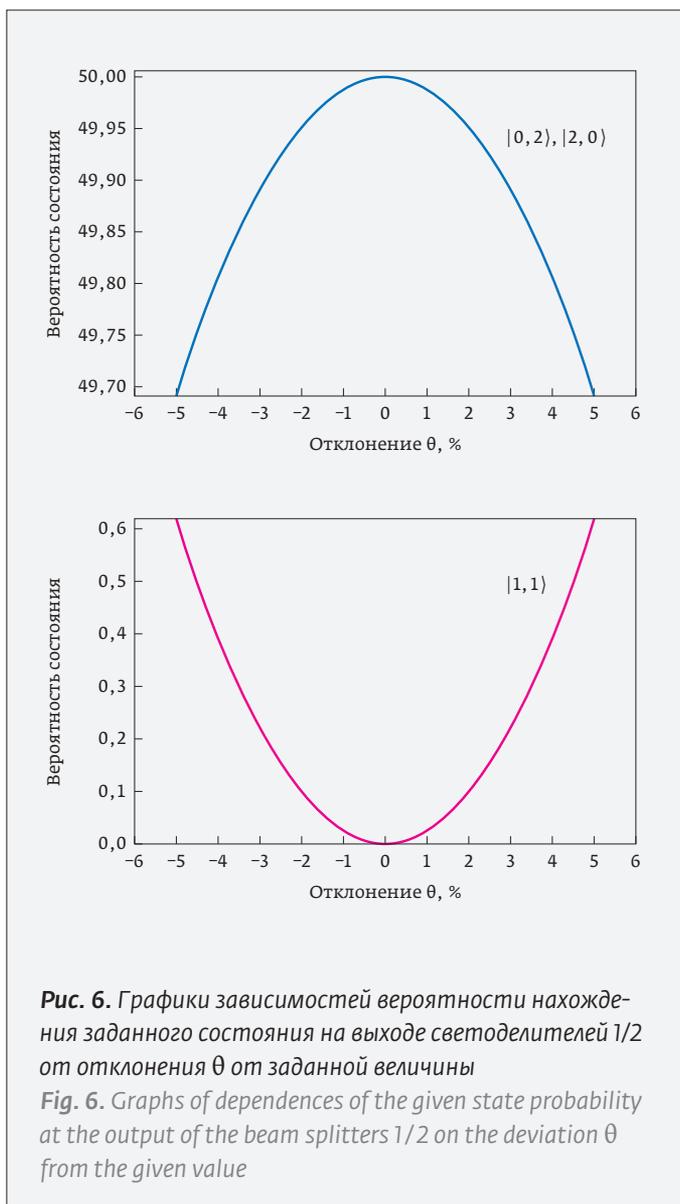
ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ГЕЙТА

Геометрические размеры гейта важны, т. к. они определяют размеры требуемых подложек ниобата лития, которые, как правило, изготавливаются стандартного диаметра 3 или 5 дюймов (7,62 или 12,7 мм).

Общая ширина гейта (ось Y) определяется расстоянием между шестью входными волноводами. При этом необходимо учитывать, что на этапе последующей сборки гейта к его входной и выходной плоскостям должны быть при-

the reflection/transmission coefficient of the beam splitter 50/50 leads to a deviation of the probability of the system location in the system states $|0, 2\rangle$ and $|2, 0\rangle$ and occurrence of an additional state $|1, 1\rangle$. Moreover, as the deviation from the theoretical model is becoming more significant, the Hong-Ou-Mandel effect [19] ceases to be observed, when two photons incident on the 50/50 beam splitter get out through one mode, since the probability of the state $|1, 1\rangle$ is increased.

Now let us consider the beam splitters BS_2 - BS_4 with a count-down ratio of 1/3 (Fig. 8, 9). It can be seen in the graph (Fig. 8) that any change in the reflection/transmission coefficient of the beam splitter 1/3, on the contrary, brings it closer to the values of the beam splitter 1/2 under certain conditions that reduces the probability of the system location in the state $|1, 1\rangle$.





клеены оптические волокна в виде сборки из четырех волокон, которые будут подсоединены к каналам В-Е (напомним, что каналы А и F нами не используются). Микросборка оптических волокон на основе V-грувов (примечание: англ. *V-Groove* – V-образная канавка) имеет минимальный стандартный шаг упаковки волокна, равный 250 мкм. Таким образом, минимальная общая ширина гейта, требуемая для размещения 6 волноводов (8 интервалов по 250 мкм с учетом зазора до края заготовки), составляет 2,0 мм. На практике, исходя из удобства работы с заготовками, механической прочности и т. д., ширина заготовки гейта может быть 3 мм.

Общая длина гейта L (вдоль направления распространения фотонов, ось X) определяется длинами линейных участков δL , длинами закругленных (S -образных) участков ΔX и длинами участков X -делителей ΔL (рис. 1). В продольном направлении мы имеем шесть S -образных участков и три участка X -делителей.

Нами в программе *Wolfram Mathematica* было проведено математическое моделирование работы электрически управляемых светоделителей и S -образных участков волноводов с целью определения их минимально допустимых длин и радиусов кривизны. Выявлено, что минимальная длина участка X -делителя ΔL должна быть не менее 8 мм. В этом случае величина управляющих напряжение не превысит 8–10 В. Мини-

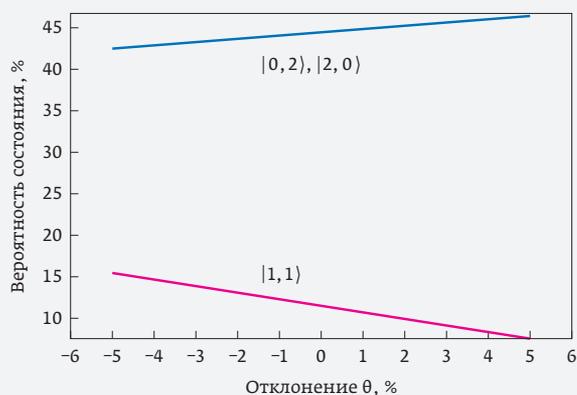


Рис. 8. График зависимостей вероятности нахождения заданного состояния на выходе светоделителя 1/3 от отклонения θ

Fig. 8. Graph of dependences of the given state probability at the output of the beam splitter 1/3 on the deviation θ

ASSESSMENT OF THE GATE GEOMETRIC DIMENSIONS

The geometric dimensions of the gate are important since they determine the dimensions of the required lithium niobate substrates that are typically manufactured with the standard diameters of 3 or 5 inches (7.62 or 12.7 mm).

The overall gate width (Y -axis) is determined by the distance between the six input waveguides. Moreover, it should be considered that at the subsequent gate assembly stage, the optical fibers in the form of a four-fiber assembly should be glued to its input and output planes to be connected to the B-E channels (we should remember that the A and F channels are not used). The V -groove-based optical fiber microassembly has a minimum standard packaging pitch of 250 μm . Thus, the minimum total gate width required to accommodate 6 waveguides (8 intervals of 250 μm ,

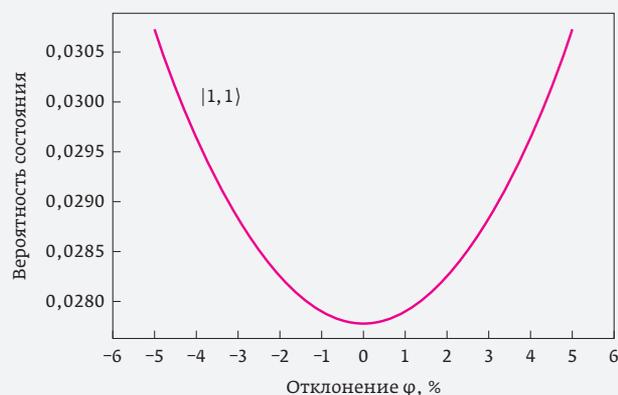
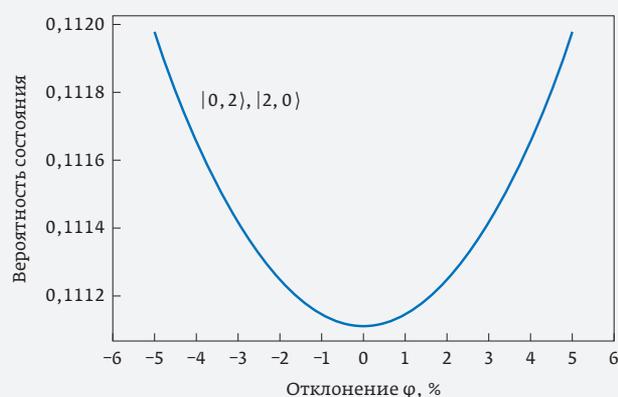


Рис. 9. График зависимостей вероятности нахождения заданного состояния на выходе светоделителя 1/3 от отклонения φ

Fig. 9. Graph of dependences of the given state probability at the output of the beam splitter 1/3 on the deviation φ



мально допустимая длина S-образных участков волноводов должна быть не менее 6 мм, в этом случае можно пренебречь потерями, связанными с модами утечки в искривленных интегрально-оптических волноводах [21]. Длина всех линейных участков между остальными элементами может быть сведена к нулю, за исключением входных и выходных линейных участков δL , длина которых может составить по 2 мм с каждого края.

Таким образом, минимальная длина гейта составляет $(3 \times 8 \text{ мм}) + (6 \times 6 \text{ мм}) + (2 \times 2 \text{ мм}) = 64 \text{ мм}$. Отсюда видно, что на даже на стандартной подложке с диаметром 3 дюйма можно разместить 3-4 заготовки для гейта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в данной работе результаты подтверждают предположение о возможной практической реализации квантового фотонного гейта на основе интегральной оптики. Основными характеристиками квантового устройства, определяющими его работоспособность, являются оптические потери, точность настройки коэффициентов деления в отдельных светоделителях и геометрические размеры. Вопросу оптических потерь будет посвящена отдельная публикация. В настоящей работе показано, что точность юстировок коэффициентов деления в пределах $\pm 0,1-0,5\%$ практически не вносят какого-либо паразитного вклада в работу гейта.

Выявлено, что неидеальность каждого из светоделителей вносит различный вклад в нарушение условий двухфотонной интерференции. Так, например, отклонения от заданных параметров в светоделителях BS_2 и BS_4 оказывают минимальное влияние на работу гейта. Далее, по степени возрастания влияния, идут светоделители BS_1 и BS_5 , и, наконец, – светоделитель BS_3 . Здесь также следует отметить, что необходимая точность юстировки коэффициентов отражения/пропускания светоделителей в интегральном исполнении практически реализуема.

Другим важным результатом является практическая оценка габаритов гейта. Используемые здесь интегрально-оптические элементы на подложке из ниобата лития имеют заметную длину. Поэтому с практической точки зрения было важно оценить весь продольный размер устройства с целью понять, какого размера должна быть подложка. Нами показано, что даже на подложках диаметром 3 дюйма может уместиться несколько заготовок.

with due regard to the gap to the blank edge) is 2.0 mm. In practice, the gate blank width can be 3 mm due to the blank operation convenience, mechanical strength, etc.

The total length of the gate L (along the photon propagation direction, X-axis) is determined by the lengths of the linear sections δL , the lengths of the rounded (S-shaped) sections ΔX , as well as the lengths of the X-coupler sections ΔL (Fig. 1). In the longitudinal direction, we have six S-shaped sections and three X-coupler sections.

In the *Wolfram Mathematica* software, we have performed mathematical modeling of the electrically controlled beam splitters and S-shaped sections of waveguides in order to determine their minimum allowable lengths and radii of curvature. It has been found that the minimum length of the X-coupler section ΔL must be at least 8 mm. In this case, the control voltage value does not exceed 8-10 V. The minimum allowable length of the waveguide S-shaped sections should be at least 6 mm. In this case it is possible to neglect the losses related to the leaking modes in the curved integrated optical waveguides [21]. The length of all linear sections between the remaining elements can be reduced to zero, except for the input and output linear sections δL that can be 2 mm from each edge.

Thus, the minimum gate length is 64 mm. This is obtained as: $(3 \times 8 \text{ мм}) + (6 \times 6 \text{ мм}) + (2 \times 2 \text{ мм}) = 64 \text{ мм}$. This formula shows that even on a standard substrate with a diameter of 3 inches can accommodate 3-4 blanks for the gate.

DISCUSSION

The results presented in this paper confirm the assumption about the possible practical implementation of a quantum photon gate based on the integrated optics. The main specifications of a quantum device that determine its performance are optical losses, adjustment accuracy of the count-down ratio in the individual beam splitters, and geometric dimensions. A separate publication will be devoted to the issue of optical losses. In this paper, it is shown that the adjustment accuracy of the count-down ratios within the range of $\pm 0.1\% - 0.5\%$ almost does not make any parasitic contribution to the gate operation.

It is found that imperfection of each of the beam splitters makes various contributions to the violation of the two-photon interference conditions. Thus, for example, deviations from the set parameters in the BS_2 and BS_4 beam splitters



REFERENCES

1. **O'Brien J. L., Pryde G. J., White A. G., Ralph T. C., Branning D.** Demonstration of all-optical quantum controlled-NOT gate. *Letters to Nature*. 2003; 426, 264–267. DOI:10.1038/nature02054.
2. **Ding Z. Y., Yang H., Yuan H., Wang D., Yang J., Ye I.** Experimental investigations of linear-entropy-based uncertainty relations in all-optical systems. *Phys. Rev. A*. 2020;101:022116. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.022116>.
3. **Gao X., Zhang Y., D'Errico A., Heshami K., Karimi E.** High-speed imaging of spatiotemporal correlation in Hong-Ou-Mandel interference. *Optics Express*. 2022;30(11): 19456–19464. DOI: 10.1364/OE.456433.
4. **Stefanov A., Zbinden H., Gisin N., Suarez A.** Quantum entanglement with acousto-optic modulators: Two-photon beats and Bell experiments with moving beam splitters. *Phys. Rev. A*. 2003; 67: 042115. DOI: 10.1103/PhysRevA.67.042115.
5. **Petrov V. M., Shamrai A. V., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Lebedev V. V.** Broadband integrated optical modulators: advances and perspectives. *UFN*. 2021; 191(7):760–782. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2020.11.038871>.
6. **Hirari A., Matsumoto Y., Sato T., Kawai T. et al.** Optical multimode interference couplers of Ti: LiNbO₃ waveguides and electrical tuning of power splitting ratio. *Optics Communications*. 2021;501:127325. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127325.
7. **Zhang M., Feng L., Li M., Chen Y. et al.** Supercompact Photonic Quantum Logic Gate on a Silicon Chip, *Phys. Rev. Letters* 126 (2021) 130501. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.130501>.
8. **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 fotopriyemnika s upravlyayemym integralno-opticheskim svetodelitelem. *Pisma v ZhTF*. 2021; 47(21): 10–12. DOI: <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.21.51620.18870>. (In Russ.).
Лебедев В. В., Петров В. М., Ильичев И. В., Агрузов 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: <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.21.51620.18870>.
9. **Petrov V., Medvedev A., Liokumovich L., Miazin A.** Fiber-optic polarization interferometric sensor for precise electric field measurements. *International Journal of Modern Physics A*. 2016; 31(2&3): 1641032–1–1. DOI: 10.1142/S0217751X16410323.
10. **Petrov V. M., Shamrai 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 Communication. *Photonics Russia*. 2020;14(5): 414–422. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.5.414.423.
11. **Vashukevich E. A., Lebedev V. V., Il'ichev I. V., Agruzov P. M., Shamrai A. V., Petrov V. M., Golubeva T. Yu.** Broadband Chip-Based Source of Quantum Noise with Electrically Controllable Beam Splitter. *Phys. Rev. Applied*. 2022;17(6) 064039. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.064039.
12. **Petrov V. M., Shamray A. V., Il'ichev I. V., Gerasimenko N. D., Gerasimenko V. S., Agruzov P. M., Lebedev V. V.** Generation of Optical Frequency Harmonics for Quantum Communication Systems at Side Frequencies. *Photonics Russia*. 2020;14(7):570–582. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.570.582.
13. **Nikonov N. V., Petrov V. M.** Golograficheskie opticheskie komponenty na osnove fotorefraktivnykh kristallov i styokol: sravnitel'nyy analiz i perspektivy razvitiya. *Optika i spektroskopiya*. 2021; 129(4): 385–392. DOI: 10.21883/OS.2021.04.50764.290-20. (In Russ.).
Никонов Н. В., Петров В. М. Голографические оптические компоненты на основе фоторефрактивных кристаллов и стекол: сравнительный анализ и перспективы развития. *Оптика и спектроскопия*. 2021;129(4): 385–392. DOI: 10.21883/OS.2021.04.50764.290-20.
14. **Martin A., Alibart O., De Micheli M. P., Ostrowsky D. B., Tanzilli S.** A quantum relay chip based on telecommunication integrated optics technology. *New Journal of Physics*. 2012;4: 025002. DOI: 10.1088/1367-2630/14/2/025002.
15. **Smith B. J., Kundis D., Thomas-Peter N., Smith P. G. R., Walmsley I. A.** Phase-controlled integrated photonic quantum circuits. *Optics Express*. 2009;17(16):13516–13525. DOI: 10.1364/OE.17.013516.

have a minimal impact on the gate operation. Next, in order of increasing influence, there are the beam splitters BS₁ and BS₅, and, finally, the beam splitter BS₃. It should also be noted that the required adjustment accuracy of the reflection/transmission coefficients of the integrated-type beam splitters is implementable.

Another important result is the practical assessment of the gate dimensions. The integrated optical elements used on a lithium niobate substrate have a noticeable length. Therefore, from a practical point of view, it is important to evaluate the entire longitudinal dimension of the device in order to determine the substrate dimensions. We have shown that even the substrates with a diameter of 3 inches can accommodate several blanks.

ABOUT THE AUTHORS

Petrov V. M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences (radiophysics), d.f.-m.s. (optics), Professor, Department of General Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000 0002 8523 0336

Koroteev D. A., student, Department of Photonics, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-5489-4017

Semisalov D. A., student, Department of Photonics, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-1757-6519

Strashilin V., student, Department of Photonics, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia. ORCID: 0000-0002-0655-0199

Khlusevich D. S. student, Department of Photonics, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-8298-9451

Yakovlev M. I., student, Institute of Laser Technologies, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-1757-6519

Parfenov M. V., Junior Researcher, Department of Quantum Electronics, Physicotechnical Institute named after A. F. Ioffe Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-3867-9007

AUTHORS CONTRIBUTION

Petrov V. M.: statement of the problem, discussion of the results; Koroteev D. A.: simulation of leaks and losses in gates; Semisalov D. A.: calculation of the curvature of waveguides and gate beamsplitters; Strashilin V.S.: calculation of the influence of non-ideal gate division coefficients; Khlusevich D. S.: calculation and participation in the manufacture of gate photomasks; Yakovlev M. I.: development and production of an experimental stand for studying gates; Parfenov M. V.: fabrication of waveguides, measurement of waveguide characteristics.



16. Wen J., Li K., Gong Y., Copner B., Hughes B. et al. Numerical investigations of on-chip wavelength conversion based on InP/In_xGa_xAs_yP_{1-y} semiconductor waveguide platforms. *Optics Communications*. 2020;473:12592. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.125921.
17. Yue J., Wang C., Lin H., Ding S. et al. Interlayer directional coupling thermo-optic waveguide switches based on functionalized epoxy-crosslinking polymers. *Optics Express*. 2022;30(9):13931–13941. DOI: 10.1364/OE.451063.
18. Johansson J. R., Nation P. D., Nori F. QuTiP 2: A Python framework for the dynamics of open quantum systems. *Comp. Phys. Comm.* 2013;184:1234. DOI: 10.1016/j.cpc.2012.11.019.
19. Knill E., Laflamme R., Milburn G. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature* 409, 46–52 (2001). <https://doi.org/10.1038/35051009>.
20. Hong C. K., Ou Z. Y., Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Phys. Rev. Lett.* 1987;59(18):2044–2046. DOI:10.1103/PhysRevLett.59.2044.
21. Koroteev D. A., Gerasimenko V. S., Gerasimenko N. D., Petrov V. M. The Role of Leaky Modes in the Operation of Devices Based on Integrated-Optical Mach-Zehnder Interferometers. *Photonics Russia*. 2022;16(3):236–245. DOI: 10.22184/1993-7296.FRoS.2022.16.3.236.244.

АВТОРЫ

Петров В. М., д.ф.-м.н. (радиофизика), д.ф.-м.н. (оптика), профессор, кафедра Общей физики – 1, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000 0002 8523 0336

Коротеев Д. А., студент, факультет Фотоники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-5489-4017

Семисалов Д. А., студент, факультет Фотоники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-1757-6519

Страшилин В. С., студент, факультет Фотоники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-0655-0199

Хлусевич Д. С., студент, факультет Фотоники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-8298-9451

Яковлев М. И., студент, Институт лазерных технологий, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-1757-6519

Парфенов М. В., м.н.с., лаборатория Квантовой электроники, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-3867-9007

ВКЛАД АВТОРОВ

Петров В. М.: постановка задачи, обсуждение результатов; Коротеев Д. А.: моделирование утечек и потерь в гейтах; Семисалов Д. А.: расчет кризисных волноводов и светоделителей гейта; Страшилин В. С.: расчет влияния неидеальности коэффициентов деления гейта; Хлусевич Д. С.: расчет и участие в изготовлении фотошаблонов гейта; Яковлев М. И.: разработка и изготовление экспериментального стенда для исследования гейтов; Парфенов М. В.: изготовление волноводов, измерение характеристик волноводов.

Программа «Микроэлектроника и фотоника»

Московская техническая школа (МТШ) Департамента инвестиционной и промышленной политики города Москвы объявила о создании Программы «Микроэлектроника и фотоника», которая направлена на подготовку специалистов в области разработки передовых отечественных микропроцессорных технологий и систем, квантовой и оптической электроники, а также системного и прикладного ПО для выпуска московскими предприятиями конкурентоспособных на мировом уровне продуктов и технологий микроэлектроники и фотоники.

Программа нацелена на повышение квалификации специалистов, занятых разработкой микроэлектроники и фотоники, и включает такие курсы, как: проектирование высокопроизводительных микропроцессоров и средств вычислительной техники, программно-аппаратных комплексов в отечественной САПР электроники, АСУ ТП на базе отечественных микроконтроллеров RISC-V, разработка IP-блоков, SDK, операционных систем, гиперконвергентных систем и систем хранения данных, основы квантовой и оптической электроники и ряд других курсов, позволяющих приобрести дополнительные компетенции в области микроэлектроники и фотоники.

<https://moscowtechschool.ru/mf>

Ключевые технологии в области защиты климата и окружающей среды

Под таким лозунгом строит свою деловую программу известная в мире лазерная выставка LASER World of PHOTONICS. На мюнхенской выставочной площадке с 27 по 30 июня 2023 года пройдет традиционная выставка. Она будет сопровождаться второй встречей на платформе квантовых технологий World of QUANT UM и Конгрессом World of Photonics (25–30 июня 2023 г.).

Планируется ведущее направление выставки – ресурсосберегающее сельское хозяйство. В этой области спектр возможностей фотоники варьируется от раннего обнаружения лесных пожаров до лазерного спектроскопической идентификации металлов и пластмасс при переработке отходов, до оптической связи в сетях мобильной связи 5G или энергосберегающих дисплеев. Системы контроля и датчики позволяют фермерам точно определять, где на их полях не всходят семена, где зерна увядают или растут сорняки, и точно документировать урожайность посевных площадей во время сбора урожая. Это помогает оценить дозировку дорогостоящего удобрения и целенаправленно бороться с сорняками.

В традиционном направлении – индустриальная фотоника – рассматриваются продукты «технологий поддержки»: светодиодное освещение и фотоэлектрические системы, фотонные измерения и производственные процессы, датчики LiDAR (Light Detection and Ranging) для прогнозирования ветровой обстановки и разведывательных спутников, хранение «зеленой» энергии, производство аккумуляторов для электромобилей и стационарных накопителей и производство биполярных пластин для топливных элементов и электролизеров, преобразующих зеленую энергию в водород.

Традиционно будут представлены лазерные инструменты для сварки, сверления, резки, структурирования и удаления материала. В орбиту внимания организаторов выставки попала проблема экспоненциального роста потребления энергии. Как отражение борьбы за снижение вычислительной мощности и объемов данных часть площадок выставки будет отдана новейшим процессорам с токопроводящими дорожками нанометрового диапазона и PIC (фотонным интегральным схемам).

<https://world-of-photonics.com>



Прогноз развития рынка гибких OLED до 2031 года

Компания Allied Market Research опубликовала отчет под названием «Рынок гибких OLED по типу (AMOLED и PMOLED), их применение (смартфоны и планшеты, телевизоры, ноутбуки и мониторы, носимые устройства и другие): глобальный анализ возможностей и отраслевой прогноз, 2021–2031 гг.

Согласно отчету, глобальная индустрия гибких OLED-панелей оценивалась в 4,1 миллиарда долларов в 2021 году и, по оценкам, принесет 117,7 миллиардов долларов к 2031 году, что свидетельствует о среднегодовом темпе роста в 40,4% с 2022 по 2031 год. В отчете представлен подробный анализ меняющихся рыночных тенденций, основные сегменты, цепочка создания стоимости, региональный ландшафт и конкурентный сценарий.

Драйверы, ограничения и возможности. Рост мирового рынка гибких OLED вызван ростом спроса на бытовую электронику с низким энергопотреблением, быстрый технологический прогресс в электронных устройствах и увеличение использования гибких OLED-экранов в разнообразной бытовой электронике, включая телевизионные дисплеи, смартфоны, смарт-часы, планшеты и другие устройства. Однако высокая стоимость производства, низкая производительность

и устойчивость к низким температурам гибких OLED-панелей, вероятно, будут препятствовать росту мирового рынка. С другой стороны, достижения в области автономных и электрических транспортных средств и растущий спрос на смартфоны с большими дисплеями и гибкими конструктивными особенностями откроют новые возможности роста для глобального рынка гибких OLED в ближайшие годы.

Сегмент AMOLED. В зависимости от типа сегмент AMOLED составил наибольшую долю – почти 2/3 мирового рынка гибких OLED в 2021 году. Ожидается, что он будет доминировать в течение прогнозируемого периода. Прогнозируется, что в том же сегменте будет наблюдаться самый быстрый среднегодовой темп роста в 41,02% с 2023 по 2031 год. Это связано с растущей потребностью в более высоких эталонных скоростях для лучших углов обзора и более плавного взаимодействия. Кроме того, технология AMOLED может быть легко интегрирована в дисплеи любого размера, что облегчает применение гибких органических светодиодов в различных устройствах: смартфонах, телевизорах, мониторах и носимых устройствах. Более того, благодаря своим уникальным свойствам – сверхгибкость и ударопроч-

ность – технология AMOLED широко используется в промышленных приложениях. Поэтому ожидается, что они будут стимулировать рост доходов в этом сегменте.

Сегмент смартфонов и планшетов занимал наибольшую долю более чем одной трети мирового рынка гибких OLED в 2021 году. Ожидается, что в течение прогнозируемого периода он сохранит значительную выручку. Это связано с растущим распространением гибкого OLED-дисплея в экранах мобильных телефонов и планшетов. Достижение высокого среднегодового темпа роста в 41,35% в 2031 году ожидается благодаря преимуществу таких дисплеев: превосходному качеству изображения и сверхвысокому коэффициенту контрастности; более широкому диапазону цветов; более высокой частоте обновления; широким углом обзора; удобству использования по сравнению с экранами на основе стекла. Сегмент ноутбуков и мониторов тоже ожидает рост. Это связано с потребностью в портативных и легких устройствах, в которых используются гибкие OLED-дисплеи для улучшения качества изображения по сравнению с традиционными ЖК-дисплеями, а также более широкие углы обзора, более яркие цвета.

По материалам <https://www.novuslight.com>

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

МЕТАЛЛООБРАБОТКА

МАШИНОСТРОЕНИЕ

4-7.04.2023

Место проведения:
Беларусь, г. Минск,
пр-т Победителей 20/2
Футбольный манеж

выставочная компания

МинскЭкспо

MINSKEXPO

www.metalworking.minskexpo.com

- ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
- ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ. ПОКРЫТИЯ
- СВАРКА И РЕЗКА
- ЛИТМЕТЭКСПО