



Фотонный компьютер. Элементная база

С. А. Степаненко

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл., Россия

Предложена реализация интерференционных логических элементов (ЛЭ), в основе функционирования которых различие значений интенсивности когерентных световых волн, возникающее в результате их взаимодействия между собой и с волноводами логических элементов. Элементы образуют функционально полный базис.

Выполняются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам «0» и «1», вырабатываемых различными элементами в заданные фиксированные интервалы времени.

Предложены средства масштабирования значений интенсивности логических констант. Получены оценки параметров элементов – быстродействия, энергопотребления, физических размеров, показывающие их преимущества по сравнению с электронными аналогами.

Области применения интерференционных ЛЭ – цифровые устройства систем управления и вычислительной техники.

Ключевые слова: интерференционный логический элемент, интерференция, функционально полный базис, масштабирование интенсивности

Статья поступила: 04.09.2020

Принята к публикации: 24.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники порождает задачи, для решения которых требуются вычислительные системы с максимальной производительностью – суперкомпьютеры. Электронные технологии, на которых основаны современные суперкомпьютеры, близки к физическому пределу. Актуальны альтернативные средства повышения производительности, в частности на основе ранее не использованных физических принципов.

Photonic computer. Element base

S. A. Stepanenko

Russian Federal nuclear center-all-Russian research Institute of experimental physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

The implementation of interference logical elements (LE) is proposed, based on the functioning of which the difference in the intensity values of coherent light waves arising as a result of their interaction with each other and with the waveguides of the logical elements.

The elements form a functionally complete basis.

The requirements for the identity of the intensity values corresponding to the logical constants “0” and “1”, generated by different elements at given fixed time intervals, are fulfilled.

Means for scaling the intensity values of logical constants are proposed. The estimates of the parameters of the elements – speed, power consumption, physical dimensions – are obtained, showing their advantages over electronic counterparts.

Fields of application of interference LEs are digital devices of control systems and computer technology.

Key words: interference logic element, interference, functionally complete basis, intensity scaling

Received on: 04.09.2020

Accepted on: 24.09.2020

INTRODUCTION

The development of science and technology gives rise to problems that require computing systems with maximum performance – supercomputers. The electronic technologies on which modern supercomputers are based are close to their physical limits. Alternative means of increasing productivity are relevant, in particular, based on previously unused physical principles.

Over the past 30 years, quantum computing has been actively studied [1]. However, the prospects for their implementation are still uncertain. Moreover, in the modern view, quantum computers allow solving a limited special class of problems.



Последние 30 лет активно исследуются квантовые вычисления [1]. Однако перспективы их реализации пока неопределенны. Более того, в современном представлении квантовые компьютеры позволяют решать ограниченный специальный класс задач.

Другой вариант увеличения производительности предусматривает создание универсальной цифровой фотонной вычислительной машины (ФВМ) [2], функционирование которой основано на эффектах взаимодействия когерентных систем световых волн, порождаемых лазерным излучением. Класс задач, для решения которых предназначена ФВМ, совпадает с классом задач, решаемых на ЭВМ.

Одним из принципиальных аспектов, определяющих возможность и целесообразность реализации ФВМ, является элементная база – логические элементы (ЛЭ), выполняющие операции над световыми импульсами.

Активные ЛЭ, задействующие нелинейные эффекты, уступают по производительности и энергоэффективности современным электронным элементам [3].

Известные пассивные ЛЭ [4-8] имеют малые длительности выполнения операции, однако характеризуются либо технологическими недостатками – разница в размерах ЛЭ, реализующих различные функции, составляет лишь 0,4 нм [5], либо одинаковыми значениями интенсивности для различных логических констант [4, 7, 8], либо необходимостью применения низкой температуры – $T \approx 3^\circ \text{K}$ и длительной релаксацией [6].

Предлагаемые ниже ЛЭ задействуют различие значений интенсивности света, возникающее в результате интерференции когерентных световых волн и их взаимодействия с волноводами. Оценки параметров этих ЛЭ показывают их конкурентоспособность с электронными аналогами и возможности применения для реализации цифровых устройств.

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛОГИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

ЛЭ выполняют операции над когерентными электромагнитными волнами. Операндами и результатами операций являются логические константы – нуль («0») и единица («1»). Они идентифицируются интенсивностью I электромагнитной волны [9], распространяемой в волноводе [10].

Электромагнитная волна – линейно поляризованная монохроматическая [9], далее – бегущая волна, представляется световым импульсом для

Another option for increasing productivity provides for the creation of a universal digital photonic computer (DPC) [2], the functioning of which is based on the effects of interaction of coherent systems of light waves generated by laser radiation. The class of problems for the solution of which the DPC is intended coincides with the class of problems solved on a computer.

One of the fundamental aspects that determine the possibility and feasibility of implementing a DPC is the element base – logical elements (LE) that perform operations on light pulses.

Active LEs that involve nonlinear effects are inferior in performance and energy efficiency to modern electronic elements [3].

Known passive LEs [4-8] have short durations of the operation, however, they are characterized either by technological drawbacks – the difference in the sizes of LEs that implement different functions is only 0.4 nm [5], or by the same intensity values for various logical constants [4, 7, 8], or the need to use a low temperature – $T \approx 3^\circ \text{K}$ and prolonged relaxation [6].

The LEs proposed below use the difference in light intensity values arising from the interference of coherent light waves and their interaction with waveguides. Estimates of the parameters of these LEs show their competitiveness with electronic analogs and the possibility of using them for the implementation of digital devices.

1. IDENTIFICATION OF LOGICAL CONSTANTS

LEs perform operations on coherent electromagnetic waves. The operands and results of operations are logical constants – zero (“0”) and one (“1”). They are identified by the intensity I of an electromagnetic wave [9] propagated in the waveguide [10].

Electromagnetic wave – linearly polarized monochromatic [9], hereinafter – traveling wave, is represented by a light pulse of duration $\tau = m\lambda / v$, where m is an integer, λ is the wavelength [9], v is the speed of light in the waveguide. The quantity $d = m\lambda$ is called the pulse size.

The value of the intensity of the output signal of the LE is generated either in the absence of input pulses – no effects are involved in the LE, or in the case of one input pulse – the effects generated by the traveling wave are involved, or in the case of two input counter impulses – the effects generated by the standing wave are used [9].

To perform logical operations, it is necessary to redistribute the intensity in the waveguides. For this, slots are used. A slit [9] is a part of the waveguide surface through which radiation is transmitted to



тельностью $\tau = m\lambda/v$, где m – целое число, λ – длина волны [9], v – скорость света в волноводе. Величина $d = m\lambda$ называется размером импульса.

Значение интенсивности выходного сигнала ЛЭ вырабатывается либо при отсутствии входных импульсов – в ЛЭ не задействуется никаких эффектов, либо в случае одного входного импульса – задействуются эффекты, порожденные бегущей волной, либо в случае двух входных встречных импульсов – задействуются эффекты, порожденные стоячей волной [9].

Чтобы выполнять логические операции необходимо перераспределять интенсивность в волноводах. Для этого применяются щели. Щелью [9] называется часть поверхности волновода, через которую излучение передается в другой волновод или в окружающую среду. Для отвода энергии из щели используется однонаправленный типа (1×2) ответвитель [10] с заданным коэффициентом ответвления $0 < q < 1$, означающим долю интенсивности, отводимую через щель в ответвительный волновод.

Остаток энергии в волноводе, имеющем m щелей, после прохождения бегущей волны пропорционален величине $I_m = I_0(1-q)^m$, где I_0 – интенсивность волны на входе в волновод. Количество энергии, выделенной из волновода через щели, пропорционально величине $\hat{I}_m = I_0 - I_0(1-q)^m$.

В процессе столкновения когерентных импульсов длительностью τ образуются пучности и узлы стоячей волны [9]. Расстояние между пучностями (и между узлами) $\lambda/2$. Если щели волновода расположены над пучностями (их $2m$ штук), то суммарная интенсивность на обоих выходах волновода составит $I_\Sigma = 4I_0(1-q)^{2m}$; при этом суммарная интенсивность, выделяемая в $2m$ щелей волновода, равна $\hat{I}_{2m} = 2I_0 - 4I_0(1-q)^{2m}$. Если щели волновода расположены над узлами, то $I_\Sigma = 2I_0(1-q)^m$; и $\hat{I}_{2m} = 2I_0 - 2I_0(1-q)^m$.

Элементы, в волноводах которых щели расположены над пучностями либо над узлами стоячей волны, называем ЛЭ первого и соответственно ЛЭ второго типа и обозначаем ЛЭ₁ и ЛЭ₂.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНО ПОЛНЫЙ БАЗИС

Применим рассмотренные эффекты для создания функционально полного базиса из элементов «И», «Исключающее ИЛИ» и «НЕ», реализующих функции $\&$, \oplus и $\bar{}$ [11].

В предлагаемых далее ЛЭ используется волноводная структура, показанная на рисунке 1. Оха-

another waveguide or to the environment. To remove energy from the slot, a unidirectional type (1×2) coupler [10] is used with a given branching ratio $0 < q < 1$, which means the fraction of the intensity diverted through the slot into the branching waveguide.

The remainder of the energy in a waveguide with m -slots after the passage of a traveling wave is proportional to the value $I_m = I_0(1-q)^m$, where I_0 is the wave intensity at the entrance to the waveguide. The amount of energy released from the waveguide through the slits is proportional to the value $\hat{I}_m = I_0 - I_0(1-q)^m$.

In the process of collision of coherent pulses of duration τ , antinodes and nodes of a standing wave are formed [9]. Distance between antinodes (and between nodes) $\lambda/2$. If the slits of the waveguide are located above the antinodes (there are $2m$ of them), then the total intensity at both outputs of the waveguide will be $I_\Sigma = 4I_0(1-q)^{2m}$; in this case, the total intensity released in $2m$ slots of the waveguide is equal to $\hat{I}_{2m} = 2I_0 - 4I_0(1-q)^{2m}$. If the slots of the waveguide are located above the nodes, then $I_\Sigma = 2I_0(1-q)^m$; and $\hat{I}_{2m} = 2I_0 - 2I_0(1-q)^m$.

Elements in the waveguides of which the slits are located above the antinodes or above the nodes of the standing wave are called the LE of the first and, accordingly, the LE of the second type, and we denote it as LE₁ and LE₂.

2. FUNCTIONALLY COMPLETE BASIS

Let us apply the considered effects to create a functionally complete basis of the elements “AND”, “exclusive OR” and “NOT”, which implement the functions $\&$, \oplus and $\bar{}$ [11].

The LEs proposed below use the waveguide structure shown in Figure 1. Let us characterize in terms of [12] its elements and the operations they perform.

A pulse with a polarization of 0° entering the waveguide at the input 1 changes after the left-side rotator $R45(-)$ the polarization plane by 45° according to the rule of the left screw and enters the waveguide through the polarization mirror $M1_1$. After the Faraday rotator $F45(+)$ it restores the plane of polarization and interacts with the slots and (if any) with the counter pulse that came after similar operations from input 2. Both pulses are coherent and equally polarized. As a result of their collision, antinodes and nodes are formed. Above the antinodes (or above the nodes), in the same plane, there are slots and bidirectional branching waveguides. The design of such a waveguide is shown in inset A to Fig. 1.

рактизуем в терминах [12] ее элементы и выполняемые ими операции.

Поступающий в волновод на вход 1 импульс с поляризацией 0° изменяет после левостороннего вращателя $R45(-)$ плоскость поляризации на 45° по правилу левого винта и через поляризационное зеркало $M1_1$ поступает в волновод. После фарадеевского вращателя $F45(+)$ он восстанавливает плоскость поляризации и взаимодействует со щелями и (при наличии) со встречным импульсом, поступившим после аналогичных операций со входа 2. Оба импульса когерентны и одинаково поляризованы. В результате их столкновения образуются пучности и узлы. Над пучностями (либо над узлами) в той же плоскости расположены щели и двунаправленные ответвительные волноводы. Устройство такого волновода показано на вставке А к рис. 1.

После взаимодействия со щелями остаточная часть импульса со входа 1 поступает на фарадеевский вращатель $F45(+)$, меняет плоскость поляризации и отражается поляризационными зеркалами $M1_2$ на правосторонний вращатель $R45(-)$, восстанавливающий исходную поляризацию. Далее отраженный зеркалом $M2$ импульс поступает на выход O_1 , где объединяется (при наличии) с импульсом со входа 2, над которым выполнялись такие же операции.

На выход O_2 поступает энергия из ответвительных волноводов, получаемая взаимодействием импульсов со щелями.

2.1. Элементы первого типа

Элемент «И». Пусть в одном из направлений, обозначенных на рис. 1 символами x_1 и x_2 , распространяется импульс размером $m\lambda$ (это означает $x_2 = 1, x_1 = 0$ или $x_2 = 0, x_1 = 1$). На выходе O_1 элемента имеем $I_{\&} = I_0(1 - q_1)^{2m}$; это соответствует $f_{\&}(x_2, x_1) = 0$.

After interacting with the slots, the residual part of the pulse from input 1 enters the Faraday rotator $F45(+)$, changes the plane of polarization and is reflected by polarizing mirrors $M1_2$ to the right-handed rotator $R45(-)$, which restores the original polarization. Further, the pulse reflected by the mirror $M2$ is fed to the output O_1 , where it is combined (if any) with the pulse from input 2, on which the same operations were performed.

The output O_2 receives energy from the branching waveguides obtained by the interaction of pulses with the slots.

2.1. Elements of the first type

Element “AND”. Let a pulse of size $m\lambda$ propagate in one of the directions indicated in Fig. 1 by symbols x_1 and x_2 (this means $x_2 = 1, x_1 = 0$ or $x_2 = 0, x_1 = 1$). At the output O_1 of the element, we have $I_{\&} = I_0(1 - q_1)^{2m}$; this corresponds to $f_{\&}(x_2, x_1) = 0$.

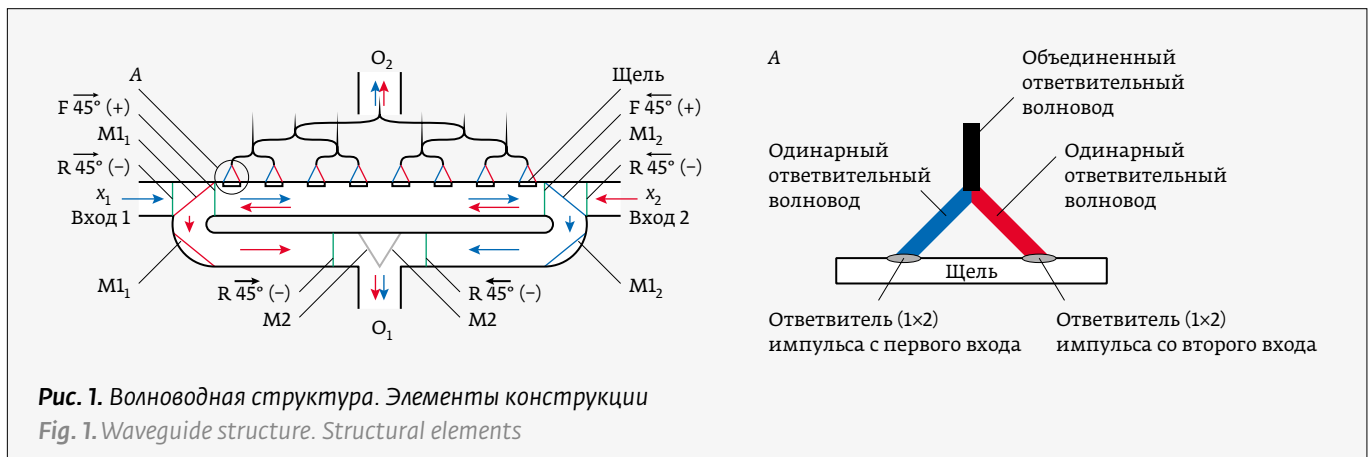
If the pulses propagate in both directions (this means $x_2 = 1, x_1 = 1$), then antinodes and nodes of a standing wave are formed. The cracks above the antinodes. At the output O_1 , we have $I_{\&} = 4I_0(1 - q_1)^{2m}$; this corresponds to $f_{\&}(x_2, x_1) = 1$.

Element “Exclusive OR”. In the case of one pulse, we have at the output O_2 the intensity $I_{\oplus} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m}$, which corresponds to $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 1$. For two opposite pulses, we have on O_2 the intensity $I_{\oplus} = 2I_0 - 4I_0(1 - q_2)^{2m}$, which corresponds to $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 0$.

Element “NOT”. Here and below, the implementation of the function $\bar{}$ (“NOT”) is achieved by supplying “1” to one of the inputs of the element that implements \oplus .

The values of the functions $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ and the corresponding values of $I_{\&}$, I_{\oplus} , are presented in Table 1.

Identity of intensity values. For the correct functioning of devices made of LEs, it is necessary that the same intensities correspond to the same logical constants obtained at the same time intervals at the out-





Если импульсы распространяются в обоих направлениях (это означает $x_2=1, x_1=1$), то образуются пучности и узлы стоячей волны. Щели расположены над пучностями. На выходе O_1 имеем $I_{\&} = 4I_0(1-q_1)^{2m}$; это соответствует $f_{\&}(x_2, x_1)=1$.

Элемент «Исключающее ИЛИ». В случае одного импульса имеем на выходе O_2 интенсивность $I_{\oplus} = I_0 - I_0(1-q_2)^{2m}$, что соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1)=1$. Для двух встречных импульсов имеем на O_2 интенсивность $I_{\oplus} = 2I_0 - 4I_0(1-q_2)^{2m}$, что соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1)=0$.

Элемент «НЕ». Здесь и далее реализация функции $\bar{}$ («НЕ») достигается подачей «1» на один из входов элемента, реализующего \oplus .

Значения функций $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ и соответствующие значения $I_{\&}$, I_{\oplus} представлены в таблице 1.

Идентичность значений интенсивности. Для корректного функционирования устройств из ЛЭ необходимо, чтобы одинаковым логическим константам, получаемым через одинаковые временные интервалы, на выходах ЛЭ, реализующих $\&$, \oplus и $\bar{}$, соответствовали одинаковые интенсивности. В частности, для ЛЭ₁ должны выполняться

$$\begin{cases} 4I_0(1-q_1)^{2m} = I_0 - I_0(1-q_2)^{2m}, \\ I_0(1-q_1)^{2m} = 2I_0 - 4I_0(1-q_2)^{2m}. \end{cases}$$

Решение этой системы уравнений

$$(1-q_1)^{2m} \approx 0,13 \text{ и } (1-q_2)^{2m} \approx 0,47.$$

Значения m задаются требуемой длительностью операции.

Получен функционально полный базис интерференционных ЛЭ₁.

2.2. ЭЛЕМЕНТЫ ВТОРОГО ТИПА

Для реализации ЛЭ₂ можно задействовать различные структуры; рассмотрим первую. Она совпадает с представленной на рисунке 1. Выходы обозначены O_1 и O_2 . Щели расположены над узлами.

Элемент «И». Одиночный импульс, означающий $x_2=1, x_1=0$ или $x_2=0, x_1=1$, взаимодействует с $2m$ щелями. На выходе O_1 имеем $I_{\&} = I_0(1-q_1)^{2m}$.

Пусть импульсы распространяются в обоих направлениях, т. е. $x_2=1, x_1=1$. В процессе их взаимодействия, которое происходит по достижению середины волновода (после m щелей), интенсивность в щели не выделяется. На выходе O_1 имеем $I_{\&} = 2I_0(1-q_1)^m$.

Элемент «Исключающее ИЛИ». Структура элемента содержит одну щель. Для одного импульса

Таблица 1. Значения $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ и $I_{\&}$, I_{\oplus} для ЛЭ₁
Table 1. Values $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ and $I_{\&}$, I_{\oplus} for LE₁

x_2	x_1	$f_{\&}$	$I_{\&}$	f_{\oplus}	I_{\oplus}
0	0	0	0	0	0
0	1	0	$I_0(1-q_1)^{2m}$	1	$I_0 - I_0(1-q_2)^{2m}$
1	0	0	$I_0(1-q_1)^{2m}$	1	$I_0 - I_0(1-q_2)^{2m}$
1	1	1	$4I_0(1-q_1)^{2m}$	0	$2I_0 - 4I_0(1-q_2)^{2m}$

puts of the LEs realizing $\&$, \oplus and $\bar{}$. In particular, for LE₁ the following must be fulfilled

$$\begin{cases} 4I_0(1-q_1)^{2m} = I_0 - I_0(1-q_2)^{2m}, \\ I_0(1-q_1)^{2m} = 2I_0 - 4I_0(1-q_2)^{2m}. \end{cases}$$

The solution to this system of equations

$$(1-q_1)^{2m} \approx 0,13 \text{ and } (1-q_2)^{2m} \approx 0,47.$$

The m values are specified by the required duration of the operation.

A functionally complete basis of interference LE₁ is obtained.

2.2. TYPE SECOND ELEMENTS

Various structures can be used to implement LE₂; consider the first. It is the same as shown in Figure 1. Outputs are designated O_1 and O_2 . The slots are located above the nodes.

Element «AND». A single pulse, meaning $x_2=1, x_1=0$, or $x_2=0, x_1=1$, interacts with $2m$ slots. At the output of O_1 , we have $I_{\&} = I_0(1-q_1)^{2m}$.

Let the impulses propagate in both directions, i. e. $x_2=1, x_1=1$. In the process of their interaction, which occurs upon reaching the middle of the waveguide (after m slots), the intensity in the slot is not released. At the output of O_1 we have $I_{\&} = 2I_0(1-q_1)^m$.

Element «Exclusive OR». The element structure contains one slit. For one pulse on O_2 , we have $I_{\oplus} = I_0q_2$, which corresponds to $f_{\oplus}(x_2, x_1)=1$. For two counter impulses, we have $I_{\oplus} = I_0\Delta$, where Δ is arbitrarily close to 0, which corresponds to $f_{\oplus}(x_2, x_1)=0$.

The values of the functions $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$, and the corresponding values of $I_{\&}$, I_{\oplus} are presented in Table 2.

Identity of intensity values. Required execution

$$\begin{cases} 2I_0(1-q_1)^m = I_0q_2, \\ I_0(1-q_1)^{2m} = I_0\Delta. \end{cases}$$

на O_2 имеем $I_{\oplus} = I_0 q_2$, что соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 1$. Для двух встречных импульсов имеем $I_{\oplus} = I_0 \Delta$, где Δ как угодно близко к 0, что соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 0$.

Значения функций $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ и соответствующие значения $I_{\&}$, I_{\oplus} представлены в таблице 2.

Идентичность значений интенсивности. Необходимо выполнение

$$\begin{cases} 2I_0(1-q_1)^m = I_0 q_2, \\ I_0(1-q_1)^{2m} = I_0 \Delta. \end{cases}$$

откуда, задавая m , находим требуемые q_1 и q_2 .

Например, при $m = 10$ имеем $q_1 = 0,1$ и $q_2 = 0,7$. Значениям $f_{\&} = f_{\oplus} = 1$ и $f_{\&} = f_{\oplus} = 0$ соответствуют $I \approx 0,7I_0$ и $I \approx 0,12I_0$.

Другие варианты реализации ЛЭ₂ получаются применением структуры, показанной на рисунке 2, и решением соответствующих систем уравнений. Примером такой системы является следующая:

$$\begin{cases} 2I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}} = (I_0 - I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2}) + \\ \quad + \tilde{q}(I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2} - I_0(1-q_2)^{2m_2}); \\ I_0(1-q_1)^{2m_1} = 2I_0 - 2I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2}. \end{cases}$$

В левой части уравнений указаны значения интенсивностей на выходе O_1 элемента «И». бегущая волна взаимодействует с $2m$ щелями и $I_f = I_0(1-q_1)^{2m_1}$. Если импульсов два, то перед столкновением импульсов и образованием узлов интенсивность в каждом направ-

лении равна $I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}}$. После столкновения интенсивность в щели не выделяется. На выходе имеем $I_f = 2I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}}$.

В правой части уравнений указаны значения интенсивностей на выходе O_2 элемента «Исключающее ИЛИ». Ответительные волноводы щелей между вращателями соединены попарно, первый ответительный волновод со стороны импульса x_1 соединен встречно с первым ответительным вол-

Таблица 2. Значения $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ и $I_{\&}$, I_{\oplus} для ЛЭ₂
Table 2. Values $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ and $I_{\&}$, I_{\oplus} for LE₂

x_2	x_1	$f_{\&}$	$I_{\&}$	f_{\oplus}	I_{\oplus}
0	0	0	0	0	0
0	1	0	$I_0(1-q_1)^{2m}$	1	$I_0 q_2$
1	0	0	$I_0(1-q_1)^{2m}$	1	$I_0 q_2$
1	1	1	$2I_0(1-q_1)^{2m}$	0	$I_0 \Delta$

whence, specifying m , we find the required q_1 and q_2 .

For example, for $m = 10$ we have $q_1 = 0,1$ and $q_2 = 0,7$. The values $f_{\&} = f_{\oplus} = 1$ and $f_{\&} = f_{\oplus} = 0$ correspond to $I \approx 0,7I_0$ and $I \approx 0,12I_0$.

Other options for the implementation of LE₂ are obtained by using the structure shown in Figure 2 and solving the corresponding systems of equations. An example of such a system is the following

$$\begin{cases} 2I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}} = (I_0 - I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2}) + \\ \quad + \tilde{q}(I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2} - I_0(1-q_2)^{2m_2}); \\ I_0(1-q_1)^{2m_1} = 2I_0 - 2I_0(1-q_2)^{2m_2 - k_2}. \end{cases}$$

On the left side of the equations, the values of the intensities at the output O_1 of the “AND” element are indicated. the traveling wave interacts with $2m$ slots and $I_f = I_0(1-q_1)^{2m_1}$. If there are two pulses, then before the collision of pulses and the formation of nodes, the intensity in each direction is equal to $I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}}$.

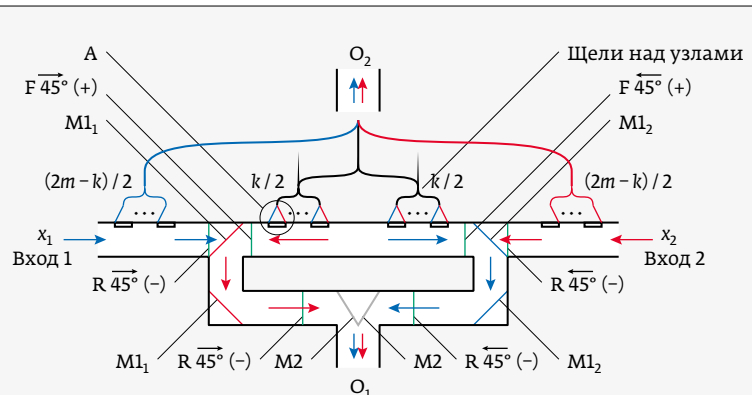


Рис. 2. Структура ЛЭ₂ вариант два
Fig. 2. Structure of LE₂, option two



новодом со стороны импульса x_2 . Над узлом, образуемым столкновением этих импульсов, устроена щель и ответвительный волновод с коэффициентом ответвления \tilde{q} .

Аналогично соединяются ответвительные волноводы, расположенные над другими i -щелями, $i=1,2,\dots,k$.

Выход элемента «Исключающее ИЛИ» получается объединением выходов ответвительных волноводов, расположенных с обеих сторон перед вращателями, и выходов попарно (встречно) соединенных ответвительных волноводов от щелей между вращателями.

В случае двух импульсов (это соответствует $x_2=1$ и $x_1=1$) имеем на выходе элемента значение $I_f = 2I_0 - 2I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2}$. В случае одного импульса, например поступающего слева (что соответствует $x_2=0$ и $x_1=1$), интенсивность на выходе элемента «Исключающее ИЛИ» равна $I_f = (I_0 - I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2}) + \tilde{q}(I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2} - I_0(1-q_2)^{2m_2})$.

Первое слагаемое обусловлено взаимодействием импульса с $(2m_2 - k_2)$ щелями, расположенными до вращателя. Второе – взаимодействием импульса с щелью, устроенной в каждом из k_2 ответвительных волноводов.

Значения функций $f(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$ и $f(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ и соответствующие значения $I_{\&}$, I_{\oplus} представлены в таблице 3.

Целесообразность применения рассмотренных вариантов определяется технологическими параметрами.

Получен функционально полный базис интерференционных ЛЭ₂.

3. МАСШТАБИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ

Оценим возможности увеличения различия значений интенсивности, соответствующих логическим «0» и логическим «1».

3.1. J-уровневые структуры элементов

Волновод, в который входные импульсы поступают извне элемента, называем волноводом первого уровня. Волновод, в который входные импульсы поступают из волновода k -го уровня, где $k=1,2,\dots$, называем волноводом $(k+1)$ уровня.

Двухуровневый ЛЭ₁ показан на рис. 3.

Назначения и обозначения конструктивных элементов, совпадают с указанными в 2.1.

В каждом волноводе ЛЭ₁ устроены $2m$ щелей в местах пучностей. Выходы элемента обозначены O_1 и O_2 .

After the collision, no intensity is released in the gap.

At the output, we have $I_f = 2I_0(1-q_1)^{2m_1 - \frac{k_1}{2}}$.

On the right side of the equations, the values of intensities at the O_2 output of the “exclusive OR” element are indicated. The branching waveguides of the slots between the rotators are connected in pairs, the first branching waveguide from the side of the pulse x_1 is connected oppositely to the first branching waveguide from the side of the pulse x_2 . A slit and a branching waveguide with a branching coefficient \tilde{q} are arranged over the node formed by the collision of these pulses.

The branching waveguides located above the other i -slots, $i=1,2,\dots,k$, are connected in a similar way.

The output of the “exclusive OR” element is obtained by combining the outputs of the branching waveguides located on both sides in front of the rotators, and the outputs of pairwise (oppositely) connected branching waveguides from the slots between the rotators.

In the case of two pulses (this corresponds to $x_2=1$ and $x_1=1$), we have at the output of the element the value $I_f = 2I_0 - 2I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2}$. In the case of one pulse, for example, coming from the left (which corresponds to $x_2=0$ and $x_1=1$), the intensity at the output of the “exclusive OR” element is

$$I_f = (I_0 - I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2}) + \tilde{q}(I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2} - I_0(1-q_2)^{2m_2})$$

The first term is due to the interaction of the momentum with $c(2m_2 - k_2)$ slots located before the rotator. The second one is the interaction of the pulse with the slot arranged in each of k_2 the branching waveguides.

The values of the functions $f(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$ and $f(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ and the corresponding values of $I_{\&}$, I_{\oplus} are presented in Table 3.

The feasibility of using the considered options is determined by the technological parameters.

Таблица 3. Значения $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ и $I_{\&}$, I_{\oplus} для ЛЭ₂
Table 3. Values $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ and $I_{\&}$, I_{\oplus} for LE₂

x_2	x_1	f_{\oplus}	I_{\oplus}	$f_{\&}$	$I_{\&}$
0	0	0	0	0	0
0	1	1	$I_0 - I_0\tilde{q}(1-q_2)^{2m_2} - I_0(1-\tilde{q})(1-q_2)^{2m_2-k_2}$	0	$I_0(1-q_1)^{2m_1}$
1	0	1	$I_0 - I_0\tilde{q}(1-q_2)^{2m_2} - I_0(1-\tilde{q})(1-q_2)^{2m_2-k_2}$	0	$I_0(1-q_1)^{2m_1}$
1	1	0	$2I_0 - 2I_0(1-q_2)^{2m_2-k_2}$	1	$2I_0(1-q_1)^{2m_1-k_1/2}$

Элемент «И». Для $x_1 = 1, x_2 = 0$ или $x_1 = 0, x_2 = 1$ имеем одиночный импульс, интенсивность которого после волновода первого уровня равна $I_{2m} = I_0(1 - q_1)^{2m}$. В результате взаимодействия с $2m$ щелями волновода второго уровня его интенсивность на выходе O_1 составит $I_{\&} = I_0(1 - q_1)^{4m}$.

В случае $x_1 = 1, x_2 = 1$ имеем на входах волновода второго уровня два встречных импульса; интенсивность каждого $I_{2m} = 2I_0(1 - q_1)^{2m}$. В результате их взаимодействия суммарное значение интенсивности на выходе O_1 , соответствующее логической единице, равно $I_{\&} = 8I_0(1 - q_1)^{4m}$.

Элемент «Исключающее ИЛИ».

Выход обозначен O_2 . Значения I_{\oplus} получаются аналогично вышеизложенному.

Значения функций $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ и соответствующие им значения $I_{\&}$, I_{\oplus} , получаемые на выходах двухуровневых ЛЭ₁, представлены в таблице 4.

Здесь отношение интенсивностей логической «1» и логического «0» в 2 раза больше, чем в одноуровневом ЛЭ₁.

Одинаковым логическим константам должны соответствовать одинаковые интенсивности на выходах ЛЭ₁. Необходимо

$$\begin{cases} 8I_0(1 - q_1)^{4m} = I_0(1 - q_2)^{2m} - I_0(1 - q_2)^{4m}, \\ I_0(1 - q_1)^{4m} = 4I_0(1 - q_2)^{2m} - 8I_0(1 - q_2)^{4m}. \end{cases}$$

Находим: $(1 - q_1)^{2m} \approx 0,2$ и $(1 - q_2)^{2m} \approx 0,5$.

Таблица 4. Значения $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ и $I_{\&}$, I_{\oplus} .

Двухуровневые ЛЭ₁

Table 4. Values $f_{\&}(x_2, x_1)$, $f_{\oplus}(x_2, x_1)$ and $I_{\&}$, I_{\oplus} . Two-level LE₁

x_2	x_1	$f_{\&}$	$I_{\&}$	f_{\oplus}	I_{\oplus}
0	0	0	0	0	0
0	1	0	$I_0(1 - q_1)^{4m}$	1	$I_0(1 - q_2)^{2m} - I_0(1 - q_2)^{4m}$
1	0	0	$I_0(1 - q_1)^{4m}$	1	$I_0(1 - q_2)^{2m} - I_0(1 - q_2)^{4m}$
1	1	1	$8I_0(1 - q_1)^{4m}$	0	$4I_0(1 - q_2)^{2m} - 8I_0(1 - q_2)^{4m}$

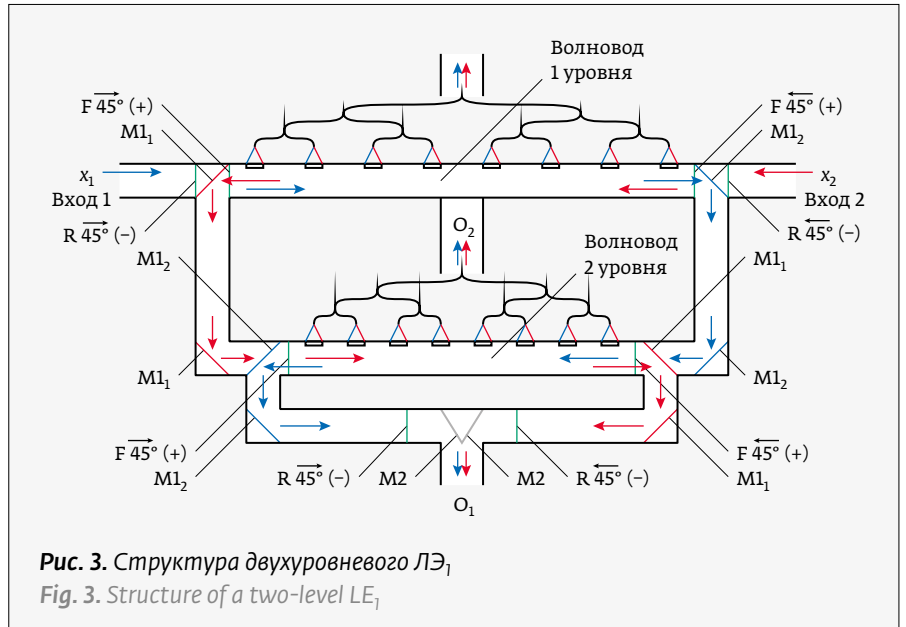


Рис. 3. Структура двухуровневого ЛЭ₁
Fig. 3. Structure of a two-level LE₁

A functionally complete basis of interference LE₂ is obtained.

3. ZOOM INTENSITY

Let us evaluate the possibilities of increasing the difference in intensity values corresponding to logical “0” and logical “1”.

3.1. J-level element structures

The waveguide into which the input pulses come from outside the element is called the first level waveguide. The waveguide into which the input pulses come from the k -th level waveguide, where $k = 1, 2, \dots$, is called the $(k + 1)$ level waveguide.

A two-level LE1 is shown in Fig. 3.

Designations and designations of structural elements coincide with those specified in 2.1.

Each LE₁ waveguide has $2m$ slots at the antinodes. The element outputs are designated O_1 and O_2 .

Element “AND”. For $x_1 = 1, x_2 = 0$ or $x_1 = 0, x_2 = 1$, we have a single pulse, the intensity of which after the waveguide of the first level is equal to $I_{2m} = I_0(1 - q_1)^{2m}$. As a result of interaction with $2m$ slots of the second-level waveguide, its intensity at the output of O_1 will be $I_{\&} = I_0(1 - q_1)^{4m}$.

In the case $x_1 = 1, x_2 = 1$, we have two counter pulses at the inputs of the second-level waveguide; the intensity of each $I_{2m} = 2I_0(1 - q_1)^{2m}$. As a result of their interaction, the total value of the intensity at the output O_1 , corresponding to a logical unit, is equal to $I_{\&} = 8I_0(1 - q_1)^{4m}$.

Element “Exclusive OR”. The output is designated O_2 . The values I_{\oplus} are obtained similarly to the above.



В общем случае для J -уровневых ЛЭ₁

$$\begin{cases} 2 \cdot 2^J I_0 (1 - q_1)^{2mj} = I_0 (1 - q_2)^{2m(J-1)} - I_0 (1 - q_2)^{2mj}, \\ I_0 (1 - q_1)^{2mj} = 2 \cdot 2^{(J-1)} I_0 (1 - q_2)^{2m(J-1)} - 2 \cdot 2^J I_0 (1 - q_2)^{2mj}. \end{cases}$$

Аналогично для J -уровневых ЛЭ₂, рассмотренных в разделе 2, необходимо

$$\begin{cases} 2I_0(1 - q_1)^{mj} = I_0 q_2^j, \\ I_0(1 - q_1)^{2mj} = \Delta. \end{cases}$$

Длительность выполнения операции J -уровневыми элементами составляет не менее τJ , где τ – длительность выполнения операции одноуровневым элементом, возможен «конвейерный» режим.

3.2. Динамика значений интенсивности

Представленные выше оценки интенсивностей на выходах ЛЭ справедливы для первого, однократного выполнения операции. В результате последовательных операций значения интенсивностей, соответствующие различным логическим константам, могут сближаться. Это обусловлено различием значений выходной интенсивности при выполнении операций над одинаковыми операндами или разными.

Пусть с выхода i -го элемента импульс поступает на вход $(i+1)$ элемента, где $i=1,2,\dots,h$. Обозначим значения интенсивностей «1» и «0» после h операций на выходе h -го элемента символами $\widetilde{I}_1^{(h)}$ и $\widetilde{I}_0^{(h)}$.

Начальные входные значения, соответствующие логической «1» и логическому «0», обозначим $\widetilde{I}_1^{(0)}$ и $\widetilde{I}_0^{(0)}$ соответственно. Для J -уровневого элемента «И» первого типа имеем

$$\begin{aligned} \widetilde{I}_1^{(h)} &= (2 \cdot 2^J (1 - q_1)^{2mj})^h \cdot \widetilde{I}_1^{(0)}, \\ \widetilde{I}_0^{(h)} &= (1 - q_1)^{2mj} \left(\sqrt{\widetilde{I}_0^{(h-1)}} + \sqrt{\widetilde{I}_1^{(h-1)}} \right)^2. \end{aligned}$$

Подставляя значения интенсивностей, получаем

$$2 \cdot 2^{(J-1)} < \frac{\sqrt{\widetilde{I}_1^{(h)}}}{\sqrt{\widetilde{I}_0^{(h)}}} < 2 \cdot 2^J.$$

Для J -уровневого элемента «И» второго типа имеем:

$$\widetilde{I}_1^{(h)} = 2^h (1 - q_1)^{hmj} \widetilde{I}_1^{(0)},$$

The values of the functions $f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1$, $f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$ and the corresponding values $I_{\&}$, I_{\oplus} , obtained at the outputs of two-level LE₁, are presented in Table 4.

Here, the ratio of the intensities of logical “1” and logical “0” is 2 times greater than in single-level LE₁.

Identical logical constants must correspond to the same intensities at the outputs of LE₁. It is necessary

$$\begin{cases} 8I_0(1 - q_1)^{4m} = I_0(1 - q_2)^{2m} - I_0(1 - q_2)^{4m}, \\ I_0(1 - q_1)^{4m} = 4I_0(1 - q_2)^{2m} - 8I_0(1 - q_2)^{4m}. \end{cases}$$

We find: $(1 - q_1)^{2m} \approx 0,2$ and $(1 - q_2)^{2m} \approx 0,5$.

In the general case, for J -level LE₁:

$$\begin{cases} 2 \cdot 2^J I_0 (1 - q_1)^{2mj} = I_0 (1 - q_2)^{2m(J-1)} - I_0 (1 - q_2)^{2mj}, \\ I_0 (1 - q_1)^{2mj} = 2 \cdot 2^{(J-1)} I_0 (1 - q_2)^{2m(J-1)} - 2 \cdot 2^J I_0 (1 - q_2)^{2mj}. \end{cases}$$

Similarly, for J -level LE₂, considered in Section 2, it is necessary:

$$\begin{cases} 2I_0(1 - q_1)^{mj} = I_0 q_2^j, \\ I_0(1 - q_1)^{2mj} = \Delta. \end{cases}$$

The duration of the operation J by level elements is at least τJ , where τ is the duration of the operation execution by a single-level element, the “pipeline” mode is possible.

3.2. Dynamics of Intensity Values

The above estimates of the intensities at the outputs of the LE are valid for the first, single execution of the operation. As a result of successive operations, the intensity values corresponding to different logical constants can approach each other. This is due to the difference in the values of the output intensity when performing operations on the same or different operands.

Let from the output of the i -th element the pulse arrives at the input $(i+1)$ of the element, where $i=1,2,\dots,h$. Let us denote the values of the intensities “1” and “0” after h operations at the output of the h -th element by the symbols $\widetilde{I}_1^{(h)}$ and $\widetilde{I}_0^{(h)}$. The initial input values corresponding to logical “1” and logical “0” will be denoted by $\widetilde{I}_1^{(0)}$ and, accordingly, $\widetilde{I}_0^{(0)}$. For J level element “AND” of the first type we have

$$\begin{aligned} \widetilde{I}_1^{(h)} &= (2 \cdot 2^J (1 - q_1)^{2mj})^h \cdot \widetilde{I}_1^{(0)}, \\ \widetilde{I}_0^{(h)} &= (1 - q_1)^{2mj} \left(\sqrt{\widetilde{I}_0^{(h-1)}} + \sqrt{\widetilde{I}_1^{(h-1)}} \right)^2. \end{aligned}$$



$$\widetilde{I}_0^{(h)} = (1 - q_1)^{2mj} \left(\sqrt{I_1^{(h-1)}} - \sqrt{I_0^{(h-1)}} \right)^2$$

Значения интенсивностей удовлетворяют условию

$$\frac{1}{2(1 - q_1)^{mj}} < \frac{\widetilde{I}_1^{(h)}}{I_0^{(h)}} < \frac{2}{(1 - q_1)^{mj}}$$

Эти соотношения справедливы и для ЛЭ «Исключающее ИЛИ» и «НЕ» обоих типов.

4. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ

Для реализации интерференционных ЛЭ могут использоваться оптоволоконные [11], либо планарно-интегральные [10] волноводы, фотонные кристаллы (ФК) [13], графеновые структуры [6].

Для локализации интенсивности в пучностях (и в узлах) необходимо, чтобы размер щели составлял $\sim 0,1\lambda$. Для $\lambda = 1,55$ мкм известны ФК [5] из кремния, удовлетворяющие этому условию. Оценим параметры ЛЭ₁ из этого ФК.

Пусть $m=4$ и $J=1$ удовлетворяют требованиям к быстрдействию и различию интенсивностей. Вычисляем $q_1 \approx 0,22$ и $q_2 \approx 0,10$.

Щели реализуются линейными дефектами в ФК [5], $q_1 \approx 0,22$ и $q_2 \approx 0,10$ достигаются при $r_d \approx 140$ нм и $r_d \approx 120$ нм, где r_d – радиус стержня дефекта; условие $r_d < 0,1\lambda$ соблюдается. Диаметр волновода для режима самоколлимации равен 6ρ , где $\rho = 0,418$ мкм – постоянная решетки кремния [5].

Для взаимной изоляции ответвительных волноводов расстояния между центрами щелей выберем $8\rho = 3,3$ мкм [5]. Фарадеевский вращатель в ФК занимает $1,5$ мкм, любой другой конструкционный элемент – около $1,0$ мкм [14]. Длину волновода принимаем $L = 75$ мкм. Длительность выполнения операции $\tau = L/v = 375 \cdot 10^{-15}$ с, где $v = 2 \cdot 10^8$ м/с скорость света в волноводе.

Предельное количество энергии в ЛЭ из кремния при $\lambda = 1,55$ мкм и $\tau = 375 \cdot 10^{-15}$ с составит $E = I\tau \approx 1,23 \cdot 10^{-11}$ Дж, где $I = \frac{\epsilon_{\text{разр}}}{\tau} = 0,67 \cdot 10^{13}$ Вт/см² – пороговое значение интенсивности, $\epsilon_{\text{разр}} = 2,5$ Дж/см² – лучевая прочность кремния при $\tau = 300 - 400 \cdot 10^{-15}$ с [14], $S \approx 4,9 \cdot 10^{-12}$ м² – площадь светового пятна. Количество фотонов в импульсе $\approx 0,09 \cdot 10^9$ шт. Для надежной идентификации импульса при $T = 300$ К достаточно 10^3 фотонов [13]. Бюджет мощности [11] $\approx 62,7$ дБ.

Выполнение одной операции при $m=4$ и $J=1$ уменьшает мощность сигнала на

Substituting the values of the intensities, we get

$$2 \cdot 2^{(J-1)} < \frac{\sqrt{\widetilde{I}_1^{(h)}}}{\sqrt{I_0^{(h)}}} < 2 \cdot 2^J$$

For the J -level element “AND” of the second type, we have

$$\begin{aligned} \widetilde{I}_1^{(h)} &= 2^h (1 - q_1)^{hmj} \widetilde{I}_1^{(0)}, \\ \widetilde{I}_0^{(h)} &= (1 - q_1)^{2mj} \left(\sqrt{I_1^{(h-1)}} - \sqrt{I_0^{(h-1)}} \right)^2. \end{aligned}$$

The intensity values satisfy the condition:

$$\frac{1}{2(1 - q_1)^{mj}} < \frac{\widetilde{I}_1^{(h)}}{I_0^{(h)}} < \frac{2}{(1 - q_1)^{mj}}$$

These relations are also valid for LE “exclusive OR” and “NOT” of both types.

4. EXAMPLE OF IMPLEMENTATION AND APPLICATION

To implement interference LEs, fiber-optic [11] or planar-integral [10] waveguides, photonic crystals (PC) [13], graphene structures [6] can be used.

To localize the intensity at the antinodes (and at the nodes), it is necessary that the size of the slit be $\sim 0,1\lambda$. For $\lambda = 1,55$, silicon photonic crystals [5] are known that satisfy this condition. Let us estimate the parameters of LE₁ from this PC.

Let $m=4$ and $J=1$ satisfy the requirements for speed and intensity difference. We calculate $q_1 \approx 0,22$ and $q_2 \approx 0,10$.

The slits are realized by linear defects in the PC [5], $q_1 \approx 0,22$ and $q_2 \approx 0,10$ are achieved at $r_d \approx 140$ nm and $r_d \approx 120$ nm, where r_d is the radius of the defect rod; the condition $r_d < 0,1\lambda$ is met. The diameter of the waveguide for the self-collimation regime is 6ρ , where $\rho = 0,418$ μm is the silicon grating constant [5].

For the mutual isolation of the branching waveguides, the distance between the centers of the slits is chosen $8\rho = 3,3$ μm [5]. A Faraday rotator in a PC takes $1,5$ μm , any other structural element is about $1,0$ μm [14]. We take the length of the waveguide $L = 75$ μm . The duration of the operation is $\tau = L/v = 375 \cdot 10^{-15}$ s, where $v = 2 \cdot 10^8$ m/s is the speed of light in the waveguide.

The limiting amount of energy in an LE made of silicon at $\lambda = 1,55$ μm and $\tau = 375 \cdot 10^{-15}$ s will be



$10 \lg \frac{2}{4(1-q_1)^8} \approx 5,85$ дБ. Без регенерации можно

выполнить 10 операций в течение $3,75 \cdot 10^{-12}$ с. Последующее применение для регенерации нелинейных оптических ключей пикосекундного диапазона [16] почти не повлияет на производительность и энергопотребление устройств.

В процессе выполнения операций импульсы передаются только в волноводах, когерентность сохраняется. Из значений интенсивности на выходах элементов (при условии учета направления движения импульса) можно установить значения интенсивностей на входах, т. е. предложенные ЛЭ обратимы [17]. Энергия остается в ЛЭ и задействуется для усиления и регенерации сигнала. Общие потери энергии определяются потерями в волноводах (эта величина составляет $\gamma = 0,1$ дБ/см), и эффективностью ввода излучения в волновод ($\mu \geq 0,9$) [3].

В [2] показано, что при $\lambda = 1,55$ мкм ФВМ из элементов с идентичными значениями γ , μ и L имеет по сравнению с ЭВМ при одинаковых энергозатратах примерно в 10^4 раз большую производительность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены структуры интерференционных логических элементов, образующих полный функциональный базис.

Длительность выполнения логической операции равна интервалу, за который световой импульс преодолевает расстояние от входа до выхода элемента.

Соблюдаются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих одинаковым логическим константам, вырабатываемых различными элементами.

Масштабирование значений интенсивности логических констант достигается увеличением количества уровней волнопроводов и сопровождается пропорциональным увеличением длительности выполнения операций.

На примере цифровой фотонной вычислительной машины показаны целесообразность и перспективность применения предложенных элементов.

Содержание этой статьи является расширенным изложением работы [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binkley S. Quantum Computing. ASCAS DOE US. April 5 2016. <http://science.energy.gov/~media/ascr/ascc/pdf/meeting/201604/2016-0405-ascac-quantum-02.pdf>.

$E = ISt \approx 1,23 \cdot 10^{-11}$ J, where $I = \frac{\epsilon_{\text{разр}}}{\tau} = 0,67 \cdot 10^{13}$ W/cm² is

the threshold value of intensity, $\epsilon_{\text{разр}} = 2,5$ J/cm² radiation resistance of silicon $\tau = 300 - 400 \cdot 10^{-15}$ s [14], $S \approx 4,9 \cdot 10^{-12}$ m² is the area of the light spot. The number of photons in a pulse $\approx 0,09 \cdot 10^9$ pcs. For reliable identification of a pulse at $T = 300$ K, 10^3 photons are sufficient [13]. Power budget [11] $\approx 62,7$ dB.

Performing one operation with $m = 4$ and $J = 1$

reduces the signal power by $10 \lg \frac{2}{4(1-q_1)^8} \approx 5,85$ dB.

Without regeneration, 10 operations can be performed within $3,75 \cdot 10^{-12}$ s. The subsequent application of nonlinear optical switches of the picosecond range for regeneration [16] will “hardly” affect the performance and power consumption of devices.

In the process of performing operations, pulses are transmitted only in waveguides, coherence is preserved. From the values of the intensity at the outputs of the elements (provided that the direction of the pulse movement is taken into account), it is possible to set the values of the intensities at the inputs, i. e. the proposed LEs are reversible [17]. The energy remains in the LE and is used to amplify and regenerate the signal. The total energy losses are determined by the losses in the waveguides (this value is $\gamma = 0,1$ dB/cm), and the efficiency of radiation input into the waveguide is ($\mu \geq 0,9$) [3].

It was shown in [2] that, at $\lambda = 1,55$ μm , a DPC made of elements with identical values of γ , μ , and L has, in comparison with a computer, at the same power consumption, about 10^4 times higher productivity.

CONCLUSION

Structures of interference logic elements that form a complete functional basis are proposed.

The duration of the logical operation is equal to the interval for which the light pulse travels the distance from the input to the output of the element.

The requirements for the identity of the intensity values corresponding to the same logical constants produced by different elements are met.

Scaling the values of the intensity of the logical constants is achieved by increasing the number of waveguide levels and is accompanied by a proportional increase in the duration of the operations.

On the example of a digital photonic computer, the expediency and prospects of using the proposed elements are shown.

The content of this article is an extended presentation of work [18].



2. Степаненко С. А. Фотонная вычислительная машина. Принципы реализации. Оценки параметров. *Доклады академии наук*. 2017; 476(4):389–394.
3. Белов П. А., Беспалов В. Г., Васильев В. Н. и др. *Оптические процессоры: достижения и новые идеи*. URL: <http://pandia.ru/77/192/21190.php>.
4. Patent RU 20751061. *Optical Logical Gate* / Poluehktov A. O.
5. Сунь Сяо-Вэнь, Ян Сю-Лунь, Мэн Сян-Фэн, Чжу Цзи-Нань, Ван Юй-Жун, Инь Юн-Кай, Дун Го-Янь. Разработка и анализ логических элементов «ИЛИ-НЕ», «ИНЕ» и «исключающее ИЛИ-НЕ» на основе эффекта интерференции. *Квантовая электроника*. 2018; 48(2):178–183.
6. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical logic gate base on graphene surface plasmon polaritons. *Optics Communications*. 2017; 403: 185–192.
7. Papaioannou M., Plum E., Valente J., Rogers E. T. F., Zheludev N. I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial. *Appl photonics*. 2016; 1: 090801. DOI: 10.1063/1.4966269.
8. Hussein M. E., Tamer A. Ali, Nadia H. Rafab. New design of a complete set of Photonic Crystals logic gates. *Optics Communications*. 2018; 411:175–181.
9. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. *Справочник по физике для инженеров и студентов вузов*. – М.: Мир и Образование. 2008.
10. Никаноров Н. В., Шандаров С. М. *Волноводная фотоника*. – С-Пб: ИТМО. 2008.
11. Вербоveckий А. А. *Основы проектирования оптоэлектронных систем связи*. – М.: Радио и связь. 2000.
12. Поспелов Д. А. *Логические методы анализа и синтеза схем*. – М.: Энергия. 1974.
13. Салех Б., Теж М. *Оптика и фотоника. Принципы и применения*. – Долгопрудный: Интеллекту 2012.
14. Котляр В. В. *Нанопотоника – манипулирование светом с помощью наноструктур*. *Компьютерная оптика*. 2008; 32(2): 119–135.
15. Gallais L., Douti D.-B., Commandre M., Bataviciute G. Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials. *Journal of Applied Physics*. 2015; 117(223103): 223103–6.
16. Patent RU 2096815. *Optical Switching-Over Element* / Goncharova O. V., Demin A. V.
17. Маймистов А. И. Обратимые логические элементы – новые области применения оптических солитонов. *Квантовая электроника*. 1995; 23(10): 1044–1048.
18. Степаненко С. А. Интерференционные логические элементы. Доклады Российской академии наук. *Математика, информатика, процессы управления*. 2020; 4: 64–69.

REFERENCES

1. Binkley S. Quantum Computing. ASCAC DOE US. April 5 2016. <http://science.energy.gov/~media/ascr/ascac/pdf/meeting/201604/2016-0405-ascac-quantum-02.pdf>.
2. Stepanenko S. A. Fotonnaya vychislitel'naya mashina. Principy realizatsii. Ocenki parametrov. *Doklady Mathematics*. 2017; 476(4):389–394.
3. Belov P. A., Bepalov V. G., Vasil'ev V. N. et al. *Opticheskie pro-cessory: dostizheniya i novye idei*. URL: <http://pandia.ru/77/192/21190.php>.
4. Patent RU 20751061. *Optical Logical Gate* / Poluehktov A. O.
5. Sun Xiao-Wen et al. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect. *Quantum Electronics*. 2018; 48 (2):178–183. doi.org/10.1070/QEL16452.
6. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A type of all-optical logic gate base on graphene surface plasmon polaritons. *Optics Communications*. 2017; 403: 185–192.
7. Papaioannou M., Plum E., Valente J., Rogers E. T. F., Zheludev N. I. All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial. *Appl Photonics*. 2016; 1: 090801. DOI: 10.1063/1.4966269.
8. Hussein M. E., Tamer A. Ali, Nadia H. Rafab. New design of a complete set of Photonic Crystals logic gates. *Optics Communications*. 2018; 411:175–181.
9. YAvorskij B.M., Detlaf A. A., Lebedev A. K. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov*. – М.: Mir i Obrazovanie. 2008.
10. Nikanorov N. V., SHandarov S. M. *Volnovodnaya fotonika*. – S-Pb: ITMO. 2008.
11. Verboveckij A. A. *Osnovy proektirovaniya optoelektronnyh sis-tem svyazi*. – М.: Radio i svyaz'. 2000.
12. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem*. – М.: Energiya. 1974.
13. Salekh B., Tejh M. *Optika i fotonika. Principy i primeneniya*. –Dolgoprudnyj: Intellect. 2012.
14. Kotlyar V. V. Nanofotonika – manipulirowanie svetom s pomoshch'yu nanostruktur. *Komp'yuternaya optika*. 2008; 32(2): 119–135.
15. Gallais L., Douti D.-B., Commandre M., Bataviciute G. Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials. *Journal of Applied Physics*. 2015; 117(223103): 223103–6.
16. Patent RU 2096815. *Optical Switching-Over Element* / Goncharova O. V., Demin A. V.
17. Majmistov A. I. Obratimye logicheskie elementy – novye oblasti primeneniya opticheskikh solitonov. *Quantum Electronics*. 1995; 25(10): 1009–1013.
18. Stepanenko S. A. Interferencionnye logicheskie elementy. *Doklady Mathematics*. 2020; 4: 64–69.

АВТОР

Степаненко Сергей Александрович, д. ф.-м. н., e-mail: SAStepanenko@vniief.ru, Российский федеральный ядерный центр-Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Россия

ABOUT AUTHOR

Stepanenko Sergey Alexandrovich, Dr. of Sc.(Phys.and Math), e-mail: SAStepanenko@vniief.ru, Russian Federal nuclear center-all-Russian research Institute of experimental physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Разработка и изготовление тонкопленочных изделий



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Разработка технологий формирования тонких пленок



Програмное обеспечение и автоматизация



Оптические элементы



Изготовление технологических устройств

Напылительный сервис

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

Сложные и уникальные покрытия

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com

