

УДК 004.272.44:004.382.2+535.2

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

© 2020 г. С. А. Степаненко^{1,*}

Представлено академиком РАН Ю.А. Трутневым 02.03.2020 г.

Поступило 20.03.2020 г.

После доработки 20.03.2020 г.

Принято к публикации 18.05.2020 г.

Интерференционные логические элементы являются базой фотонной вычислительной машины, предназначенной (в отличие от квантовых компьютеров) для решения одинакового с ЭВМ класса задач и позволяющей наращивать производительность независимо от ограничений электронных технологий. Предложенные интерференционные логические элементы образуют полный функциональный базис. Выполняются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам “0” и “1”. Разработан метод масштабирования значений интенсивности. Получены оценки параметров интерференционных логических элементов, показывающие их преимущества по сравнению с электронными аналогами.

Ключевые слова: интерференционные логические элементы, цифровые фотонные устройства

DOI: 10.31857/S2686954320040189

Предложена реализация 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. Получены оценки параметров элементов, показаны возможности применения этих элементов для синтеза цифровых управляющих и вычислительных устройств.

В [1] предложены принципы реализации и получены оценки производительности, потребляемой энергии и физических размеров универсальной фотонной вычислительной машины (ФВМ), показывающие ее преимущества по сравнению с электронной. В основе этих оценок – параметры логических элементов, выполняющих операции над световыми импульсами.

Активные ЛЭ, действующие нелинейные эффекты, уступают по производительности и энергоэффективности современным электронным элементам [2]. Известные пассивные ЛЭ [3–7] имеют малые длительности выполнения операции, однако характеризуются либо технологическими недостатками – разница в размерах ЛЭ, реализующих различные функции, составляет лишь 0.4 нм [4], либо одинаковыми значениями интенсивности

для различных логических констант [3, 6, 7], либо необходимостью применения низкой температуры – $T \approx 3$ К и длительной релаксацией [5].

Предлагаемые ниже пассивные интерференционные ЛЭ задействуют различие значений интенсивности света, возникающее в результате интерференции когерентных световых волн и их взаимодействия с волноводами. Оценки параметров этих ЛЭ конкурентны с электронными аналогами. Применение интерференционных ЛЭ для создания ФВМ, предназначенной (в отличие от квантовых компьютеров) для решения одинакового с ЭВМ класса задач, обеспечивает рост производительности вычислительных средств, независимо от физических пределов электронных технологий.

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 [8], распространяемой в волноводе [9].

Электромагнитная волна – линейно поляризованная монохроматическая [8], далее – бегущая волна, представляется световым импульсом длительностью $\tau = m\lambda/v$, где m – целое число, λ – длина волны [8], v – скорость света в волноводе. Величина $d = m\lambda$ называется размером импульса.

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия
*E-mail: ssa@vniief.ru

Значение интенсивности выходного сигнала ЛЭ вырабатывается либо при отсутствии входных импульсов – в ЛЭ не задействуются никакие эффекты, либо для одного входного импульса – задействуются эффекты бегущей волны, либо для двух входных встречных импульсов – задействуются эффекты стоячей волны [8].

Выполнение логической операции означает перераспределение интенсивности в волноводе. Для этого применяются щели. Щель – часть поверхности волновода, через которую излучение передается в другой волновод или в окружающую среду [8]. Для отвода энергии из щели используется однонаправленный типа (1×2) ответвитель [10] с коэффициентом отщепления $0 < q < 1$, означающим долю отводимой интенсивности.

Остаток энергии в волноводе, имеющем m щелей, после прохождения бегущей волны пропорционален величине

$$I_{\Sigma} = I_0 (1 - q)^m,$$

где I_0 – интенсивность волны на входе в волновод. Количество энергии, выделенной из волновода через щели, пропорционально величине

$$I_{\Delta} = I_0 - I_0 (1 - q)^m.$$

В процессе столкновения когерентных импульсов длительностью τ образуются пучности и узлы стоячей волны [8]. 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

$$I_{\Delta} = 2I_0 - 4I_0 (1 - q)^{2m}.$$

Если щели волновода расположены над узлами, то

$$I_{\Sigma} = 2I_0 (1 - q)^m,$$

$$I_{\Delta} = 2I_0 - 2I_0 (1 - q)^m.$$

Значения I_{Σ} , I_{Δ} идентифицируют логические константы.

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 $-$ [11]. В предлагаемых

далее ЛЭ используется волноводная структура, показанная на рис. 1. Охарактеризуем в терминах [12] ее элементы и выполняемые ими операции. Выходы обозначены O_1 и O_2 .

Поступающий в волновод на вход 1 импульс с поляризацией 0° изменяет после левостороннего вращателя $R\overline{45}(-)$ плоскость поляризации на 45° по правилу левого винта и через поляризационное зеркало $M1_1$ поступает в волновод. После фарадеевского вращателя $F\overline{45}(+)$ 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 $F\overline{45}(+)$, отражается зеркалами $M1_2$ на $R\overline{45}(-)$, восстанавливающий исходную поляризацию, и после отражения зеркалом $M2$ поступает на O_1 , где объединяется (при наличии) с импульсом со входа 2.

На O_2 поступает суммарная энергия из ответвительных волнопроводов.

2.1. Элементы первого типа

Элемент “И”. Если в волноводе (см. рис. 1) распространяется один импульс ($x_2 = 1, x_1 = 0$ или $x_2 = 0, x_1 = 1$), на O_1 имеем

$$I_{\&} = I_0 (1 - q_1)^{2m};$$

это соответствует $f_{\&}(x_2, x_1) = 0$.

Если импульсы распространяются в обоих направлениях ($x_2 = 1, x_1 = 1$), то образуются пучности и узлы. На O_1 имеем

$$I_{\&} = 4I_0 (1 - q_1)^{2m};$$

это соответствует $f_{\&}(x_2, x_1) = 1$.

Элемент “исключающее ИЛИ”. Для одного импульса имеем

$$I_{\oplus} = I_0 - I_0 (1 - q_2)^{2m} \quad \text{на } O_2,$$

это соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 1$. Для двух импульсов имеем

$$I_{\oplus} = 2I_0 - 4I_0 (1 - q_2)^{2m} \quad \text{на } O_2,$$

это соответствует $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 0$.

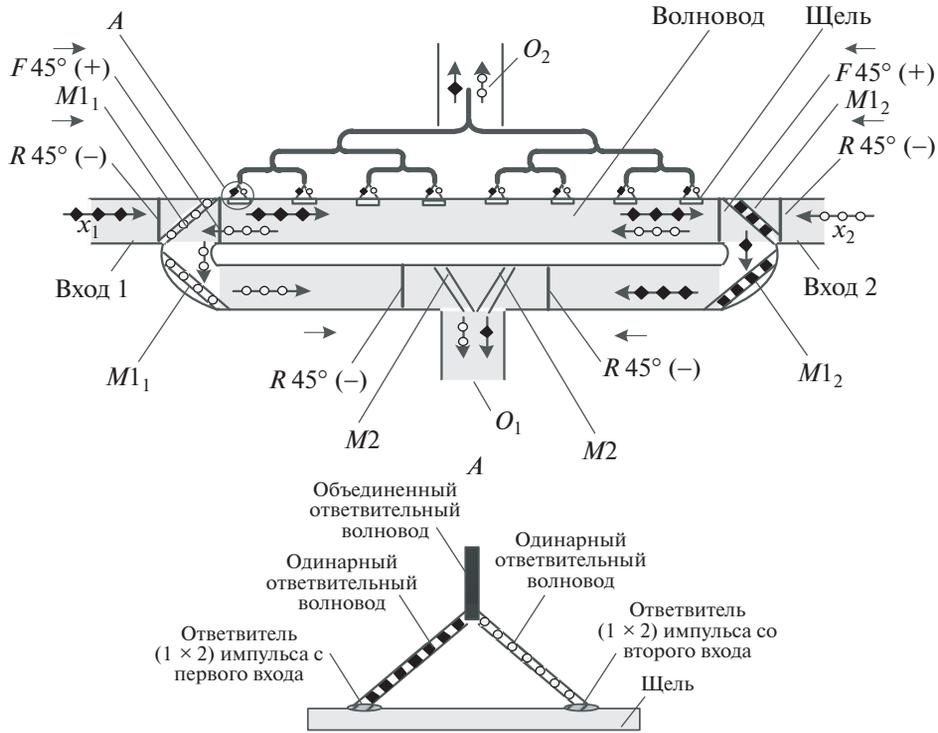


Рис. 1. Волноводная структура. Элементы конструкции.

Элемент “НЕ”. Здесь и далее реализация функции “НЕ” достигается подачей “1” на один из входов элемента, реализующего \oplus . Значения функций

$$f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1, \quad f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$$

и соответствующие значения $I_{\&}$, I_{\oplus} представлены в табл. 1.

Идентичность значений интенсивности. Одинаковым логическим константам на выходах ЛЭ₁, реализующих $\&$, \oplus и $-$, должны соответствовать одинаковые интенсивности; необходимо выполнение

$$4I_0(1 - q_1)^{2m} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m},$$

$$I_0(1 - q_1)^{2m} = 2I_0 - 4I_0(1 - q_2)^{2m}.$$

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

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	$2I_0 - 4I_0(1 - q_2)^{2m}$

Имеем:

$$(1 - q_1)^{2m} \approx 0.13 \quad \text{и} \quad (1 - q_2)^{2m} \approx 0.47.$$

Значения m задаются требуемой длительностью операции, необходимые q_1 и q_2 получаются технологически при изготовлении ЛЭ.

Получен функционально полный базис ЛЭ₁.

2.2. Элементы второго типа

Структура ЛЭ₂ совпадает с представленной на рис. 1. Щели 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 O_1 имеем

$$I_{\&} = I_0(1 - q_1)^{2m}.$$

Для двух импульсов ($x_2 = 1, x_1 = 1$) на O_1 имеем

$$I_{\&} = 2I_0(1 - q_1)^{2m}.$$

Элемент “исключающее ИЛИ”. В элементе одна щель. Для одного импульса имеем на O_2 значение $I_{\oplus} = I_0q_2$: для встречных импульсов $I_{\oplus} = I_0\Delta$, где Δ как угодно близко к 0. Значения функций

$$f_{\&}(x_2, x_1) = x_2 \& x_1, \quad f_{\oplus}(x_2, x_1) = x_2 \oplus x_1$$

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

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_0q_2
1	0	0	$I_0(1 - q_1)^{2m}$	1	I_0q_2
1	1	1	$2I_0(1 - q_1)^m$	0	$I_0\Delta$

и соответствующие значения $I_{\&}$, I_{\oplus} представлены в табл. 2.

Идентичность значений интенсивности. Необходимо выполнение

$$2I_0(1 - q_1)^m = I_0q_2,$$

$$I_0(1 - q_1)^{2m} = I_0\Delta,$$

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 $I = 0.7$ и $I = 0.12$.

Получен функционально полный базис ЛЭ₂.

3. МАСШТАБИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ

Отличие интенсивностей, соответствующих “0” и “1”, можно увеличить.

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 $(k + 1)$ -го уровня.

Двухуровневый ЛЭ₁ показан на рис. 2.

В каждом волноводе ЛЭ₁ устроены $2m$ щелей в местах пучностей.

Для J -уровневых ЛЭ₁ необходимо

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

В первом уравнении указаны значения интенсивности, соответствующие “1” на выходах элементов “И” и “исключающее ИЛИ”, во втором – соответствующие “0”; для заданных m и J вычисляются q_1 и q_2 .

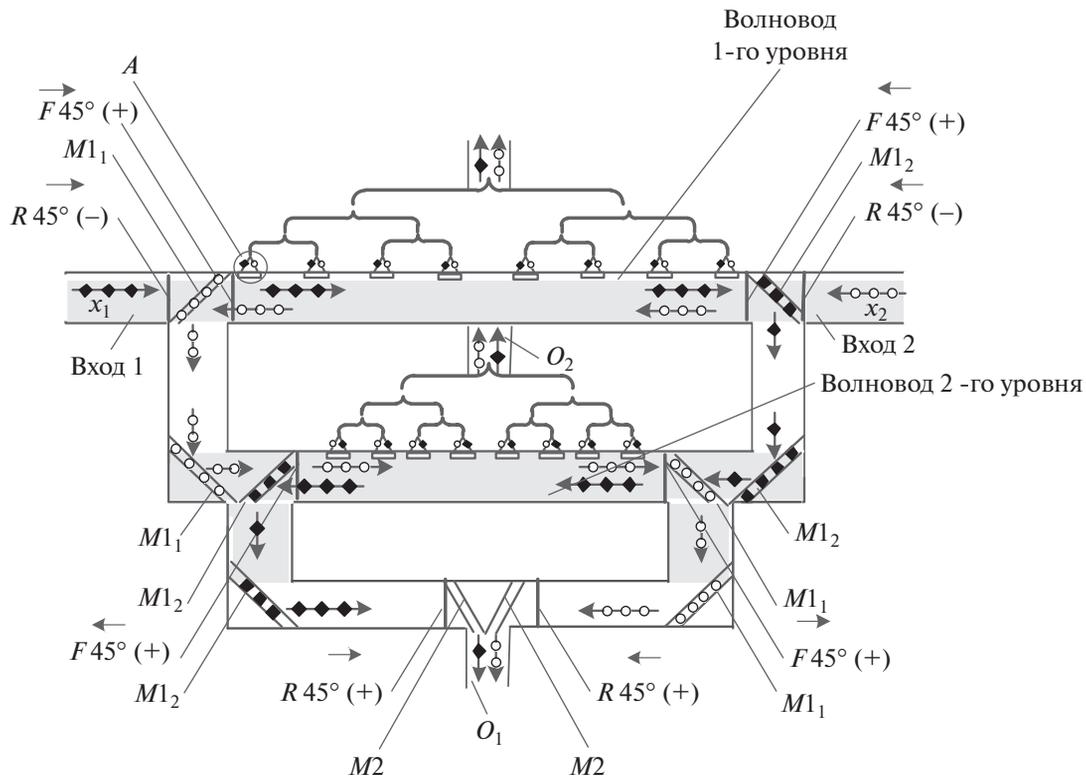


Рис. 2. Структура двухуровневого ЛЭ₁.

Отношение интенсивностей “1” и “0” равно $2 \cdot 2^J$. Аналогично для J -уровневых ЛЭ₂ необходимо

$$\begin{aligned} 2I_0(1-q_1)^{mJ} &= I_0q_2^J, \\ I_0(1-q_1)^{2mJ} &= I_0\Delta. \end{aligned}$$

Отношение интенсивности “1” и “0” равно $\frac{2}{(1-q_1)^{mJ}}$.

Длительность операции J -уровневым элементом составляет не менее τJ , где τ – длительность операции одноуровневым элементом.

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 над разными.

Пусть с выхода i -го элемента импульс поступает на вход $(i+1)$ -го элемента, где $i = 1, 2, \dots, h$. Значения интенсивностей “1” и “0” на выходе h -го элемента обозначим $\widetilde{I}_1^{(h)}$ и $\widetilde{I}_0^{(h)}$. Начальные входные значения, соответствующие “1” и “0”, обозначим соответственно $\widetilde{I}_1^{(0)}$ и $\widetilde{I}_0^{(0)}$. Для J -уровневого элемента “И” первого типа имеем

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

Получаем

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

Для J -уровневого элемента “И” второго типа имеем

$$\begin{aligned} \widetilde{I}_1^{(h)} &= 2^h (1-q_1)^{hmJ} \widetilde{I}_1^{(0)} \quad \text{и} \\ \widetilde{I}_0^{(h)} &= (1-q_1)^{2mJ} \left(\sqrt{\widetilde{I}_0^{(h-1)}} + \sqrt{\widetilde{I}_1^{(h-1)}} \right)^2. \end{aligned}$$

Получаем

$$\frac{1}{2(1-q_1)^{mJ}} < \frac{\widetilde{I}_1^{(h)}}{\widetilde{I}_0^{(h)}} < \frac{2}{(1-q_1)^{mJ}}.$$

Эти соотношения верны и для других ЛЭ обоих типов.

4. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ

Оценим параметры ЛЭ₁ из кремниевого фотонного кристалла (ФК) [4] для $\lambda = 1.55$ мкм. Пусть $m = 4$ и $J = 1$ удовлетворяют требованиям к быстродействию и различию интенсивностей. Вычисляем $q_1 \approx 0.22$ и $q_2 \approx 0.10$.

Щели реализуются линейными дефектами в ФК [4], $q_1 = 0.22$ и $q_2 = 0.10$ достигаются при $r_d \approx 140$ нм и $r_d \approx 120$ нм, где r_d – радиус стержня дефекта. Значения $r_d < 0.1\lambda$, это необходимо для локализации интенсивности в пучностях и узлах. Диаметр волновода для режима самоколлимации равен $6p$, где $p = 0.418$ мкм – постоянная решетки кремния [4].

Для взаимной изоляции ответственных волноводов расстояние между центрами щелей выберем $8p = 3.3$ мкм [4]. Фарадеевский вращатель в ФК занимает 1.5 мкм, любой другой конструктивный элемент – около 1.0 мкм [13]. Длина волновода $L = 75$ мкм. Длительность выполнения операции $\tau = L/v = 375 \times 10^{-15}$ с, где $v = 2 \times 10^8$ м/с – скорость света в волноводе.

Предельное количество энергии в ЛЭ из кремния при $\lambda = 1.55$ мкм и $\tau = 375 \times 10^{-15}$ с составит $E = I S \tau \approx 1.23 \times 10^{-11}$ Дж, где $I = \frac{\epsilon_{\text{разр}}}{\tau} = 0.67 \times 10^{13}$ Вт/см² – пороговое значение интенсивности, $\epsilon_{\text{разр}} = 2.5$ Дж/см² – лучевая прочность кремния при $\tau = 300\text{--}400 \times 10^{-15}$ с [14], $S \approx 4.9 \times 10^{-12}$ м² – площадь светового пятна. Количество фотонов в импульсе $\approx 0.09 \times 10^9$ шт. Для надежной идентификации импульса при $T = 300$ К достаточно 10^3 фотонов [12]. Бюджет мощности [10] ≈ 62.7 дБ.

Выполнение одной операции при $m = 4$ и $J = 1$ уменьшает мощность сигнала на $10 \lg \frac{2}{4(1-q_1)^{16}} \approx 5.85$ дБ. Без регенерации можно выполнить 10 операций в течение 3.75×10^{-12} с. Последующее применение для регенерации нелинейных оптических ключей пикосекундного диапазона [15] “почти” не повлияет на производительность и энергопотребление устройств.

В процессе выполнения операций импульсы передаются только в волноводах, когерентность сохраняется. 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 $\mu \geq 0.9$ [2].

Показано [1], 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 интерференционные ЛЭ, образующие полный функциональный базис. Выполняются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих одинаковым логическим константам, вырабатываемых различными элементами. Значения интенсивности масштабируются.

Получены оценки параметров интерференционных ЛЭ — длительности выполнения операций, требуемое количество энергии, физические размеры, — показывающие их преимущества по сравнению с электронными аналогами и перспективы создания цифровых фотонных управляющих и вычислительных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко С.А. Фотонная вычислительная машина. Принципы реализации. Оценки параметров // ДАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 389–394.
2. Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н. и др. Оптические процессоры: достижения и новые идеи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rapdia.ru/77/192/21190.php>
3. Полуэктов А.О. Оптический логический элемент. Патент РФ 20751061. Опубликовано 10.03.1997.
4. 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”, “И-НЕ” и “исключающее ИЛИ-НЕ” на основе эффекта интерференции // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 2. С. 178–183.
5. Xiaoting Wu, Jinping Tian, Rongcao Yang. A Type of All-Optical Logic Gate Base on Graphene Surface Plasmon Polaritons // Optics Communications. 2017. V. 403. P. 185–192.
6. 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 // APL PHOTONICS. 2016. № 1. 090801. <https://doi.org/10.1063/1.4966269>
7. Hussein M.E., Tamer A.Ali, Nadia H.Rafab. New Design of a Complete Set of Photonic Crystals Logic Gates // Optics Communications. 2018. V. 411. P. 175–181.
8. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: ООО “Издательство Оникс”: ООО “Издательство “Мир и Образование”, 2008. 1056 с.
9. Никаноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника. СПб: ИТМО, 2008.
10. Вербовецкий А.А. Основы проектирования оптоэлектронных систем связи. М.: Радио и связь, 2000.
11. Поспелов Д.А. Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974. 368 с.
12. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Т. 1, 2. Долгопрудный: Интеллект, 2012.
13. Котляр В.В. Нанопотоника — манипулирование светом с помощью наноструктур // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32. № 2. С. 119–135.
14. Gallais L., Doui D.-B., Commandre M., Bataviciute G. Wavelength Dependence of Femtosecond Laser-Induced Damage Threshold of Optical Materials // J. Appl. Physics. 2015. V. 117. P. 223103-6.
15. Гончарова О.В., Демин А.В. Оптический переключающий элемент. Патент РФ 2096815, опубликован 20.11.1997.

INTERFERENCE-BASED LOGIC GATES

S. A. Stepanenko^a

^a Russian Federal Nuclear Center — The All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhii Novgorod oblast, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS Yu. A. Trutnev

Interference-based logic gates serve as a basis for photonic computers intended (as distinct from quantum computers) for the same class of problems as electronic computers and making it possible to increase the performance irrespective of limitations inherent in electronic technologies. The proposed interference-based logic gates represent a complete basic functional set. They meet the requirement of identity between the intensity values corresponding to logic constants “0” and “1”. A method for intensity scaling has been developed. Parameters of interference-based logic gates, including operation execution time, power consumption and dimensions, were estimated and demonstrated their advantages over their electronic counterparts.

Keywords: interference-based logic gates, digital photonic devices