

УДК 004.272.44:004.382.2+535.2  
DOI 10.53403/9785951505071\_2022\_451

## ФОТОННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАШИНА. ОПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

*С. А. Степаненко*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Предложены структуры интерференционных логических элементов, образующих полный функциональный базис. Выполняются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам «0» и «1», вырабатываемых различными элементами в заданные фиксированные интервалы времени.

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

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

*Ключевые слова:* фотонная машина, оптический логический элемент, волновод.

### Введение

Возможность и целесообразность реализации фотонной вычислительной машины [1] определяются, в частности, параметрами оптических логических элементов (ОЛЭ).

Активные ОЛЭ из известных материалов, задействующие нелинейные эффекты, уступают по производительности и энергоэффективности современным электронным элементам [2].

Пассивные ОЛЭ [3–7] имеют малые длительности выполнения операции, однако характеризуются большими потерями энергии и трудностями сохранения параметров сигнала.

Предлагаемые ниже интерференционные ОЛЭ задействуют различие значений интенсивности света, возникающее в результате отсутствия или наличия интерференции световых волн и их взаимодействия с волноводами. Показано применение этих ОЛЭ для создания фотонной вычислительной машины и других, конкурентных с электронными аналогами цифровых устройств.

### 1. Идентификация логических констант

ОЛЭ выполняют логические операции над световыми импульсами, образованными электромагнитными волнами. В результате операций получают логические константы – логический ноль («0») и логическая единица («1»). Они идентифицируются интенсивностью  $I$  электромагнитной волны [8], распространяемой в оптическом волноводе [9].

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

Значение интенсивности выходного сигнала ОЛЭ вырабатывается либо при отсутствии входных импульсов – в ОЛЭ 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 [8].

Чтобы выполнять логические операции необходимо перераспределять интенсивность в волноводах. Для этого применяются щели. Щелью [8] 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 [9] 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.

Согласно закону сохранения, количество энергии, выделенной из волновода в результате взаимодействия бегущей волны с  $m$  щелями, пропорционально величине  $I_m = I_0 - I_0(1 - q)^m$ .

В результате столкновения когерентных импульсов длительностью  $\tau$  образуется стоячая волна с  $2m$  пучностями на расстоянии  $\lambda/2$  одна от другой и  $2m$  узлами, также удаленными на  $\lambda/2$  один от другого [8]. Если щели волновода расположены над пучностями, 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  $I_{2m} = 2I_0 - 4I_0(1 - q)^{2m}$ . Если щели волновода расположены над узлами, то  $I_{\Sigma} = 2I_0(1 - q)^m$ ; при этом,  $I_{2m} = 2I_0 - 2I_0(1 - q)^m$ .

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

## 2. Функционально полный базис

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

В рассматриваемых далее ОЛЭ используется волноводная структура, показанная на рис. 1.

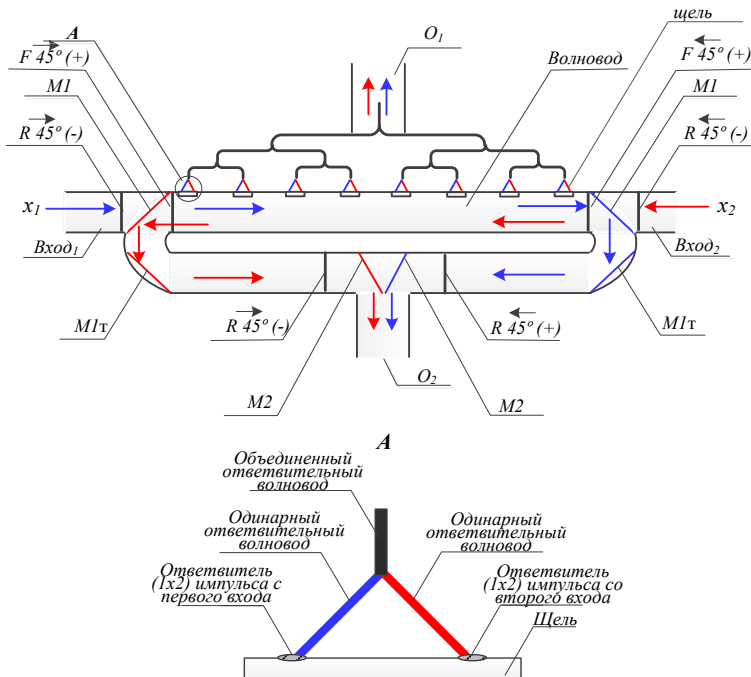


Рис. 1. Волноводная структура. Элементы конструкции

Назначение ее элементов охарактеризуем согласно [12].

Поступающий в волновод на вход 1 импульс с поляризацией  $0^\circ$  изменяет после левостороннего вращателя  $R\overline{45}(-)$  плоскость поляризации на  $45^\circ$  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, имеют одинаковую поляризацию. 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 к рис. 1.

После взаимодействия со щелями оставшаяся часть импульса со входа 1 поступает на фарадеевский вращатель  $F\overline{45}(-)$ , меняет плоскость поляризации и отражается поляризационными зеркалами  $M1_1, M1_2$  на вращатель  $R\overline{45}(+)$ , 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 волновода.

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

Если импульсы распространяются в обоих направлениях (это означает  $x_2 = 1, x_1 = 1$ ), то образуется стоячая волна. На выходе  $O_1$  имеем  $I_{\&} = 4I_0(1 - q_1)^{2m}$ ; это соответствует  $f_{\&}(x_2, x_1) = 1$ .

### ЭЛЕМЕНТ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

Выход элемента обозначен  $O_2$ , он объединяет волноводы от  $2m$  щелей над пучностями стоячей волны. В случае одного импульса на  $O_2$  имеем  $I_{\oplus} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m}$ , что соответствует  $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 1$ . Для двух встречных импульсов на  $O_2$  имеем,  $I_{\oplus} = 2I_0 - 4I_0(1 - q_2)^{2m}$ , что соответствует  $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 0$ .

### ЭЛЕМЕНТ «НЕ»

Реализация функции  $\bar{\quad}$  («НЕ») достигается подачей на один из входов элемента  $\oplus$  единичного сигнала – логической единицы.

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 табл. 1.

Таблица 1

Значения  $f_{\&}(x_2, x_1)$ ,  $f_{\oplus}(x_2, x_1)$  и  $I_{\&}$ ,  $I_{\oplus}$ . Элементы первого типа

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

## ИДЕНТИЧНОСТЬ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Для корректного функционирования устройств из ОЛЭ необходимо, чтобы одинаковым логическим значениям, получаемым через одинаковые временные интервалы, на выходах ОЛЭ, реализующих  $\&$ ,  $\oplus$  и  $-$ , соответствовали одинаковые интенсивности  $I_{\&}$ ,  $I_{\oplus}$ . Необходимо выполнение:

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

Решением этой системы уравнений является:

$$(1 - q_1)^{2m} = 0,133 \text{ и } (1 - q_2)^{2m} = 0,466.$$

Значения  $m$  задаются требуемой длительностью операции.

Получен функционально полный базис интерференционных ОЛЭ первого типа.

## 2.2. Элементы второго типа

Структура ОЛЭ второго типа показана на рис. 2, выходы обозначены  $O_1$  и  $O_2$ . Перед каждым входным вращателем устроены  $(2m - \frac{k_1}{2})$  щелей. Между вращателями устроены  $k_1 < 2m$  щелей, расположенные над узлами. Остальные конструктивные элементы совпадают с указанными на рис. 1.

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

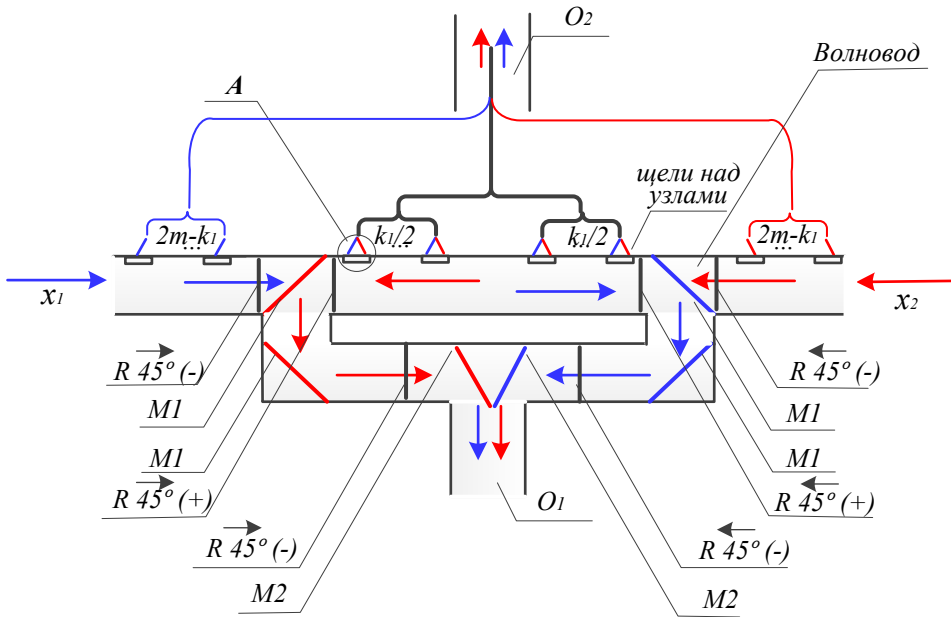


Рис. 2. Структура ОЛЭ второго типа

Если импульсы распространяются в обоих направлениях (т. е.  $x_2 = 1, x_1 = 1$ ), то перед столкновением импульсов и образованием стоячей волны интенсивность в каждом направлении равна  $I_0(1 - q_1)^{2m - k_1/2}$ . После столкновения интенсивность в щели не выделяется, так как щели расположены над узлами. На выходе  $O_1$  имеем  $I_{\&} = 2I_0(1 - q_1)^{2m - k_1/2}$ .

### ЭЛЕМЕНТ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

Выход элемента обозначен  $O_2$ , он объединяет ответвительные волноводы. В случае одного импульса имеем  $I_{\oplus} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m}$ , что соответствует  $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 1$ . Для двух встречных импульсов имеем,  $I_{\oplus} = 2I_0 - 2I_0(1 - q_2)^{2m}$ , что соответствует  $f_{\oplus}(x_2, x_1) = 0$ .

### ЭЛЕМЕНТ «НЕ»

Реализация функции  $\bar{\quad}$  («НЕ») достигается подачей на один из входов элемента  $\oplus$  постоянного единичного сигнала – логической единицы.

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 табл. 2.

Таблица 2

Значения  $f_{\&}(x_2, x_1)$ ,  $f_{\oplus}(x_2, x_1)$  и  $I_{\&}$ ,  $I_{\oplus}$ . Элементы второго типа

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

### ИДЕНТИЧНОСТЬ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Потребуем равенства значений  $I_{\&}$  и  $I_{\oplus}$ , соответствующих одинаковым логическим константам:

$$\begin{cases} 2I_0(1 - q_1)^{2m - \frac{k_1}{2}} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m}; \\ I_0(1 - q_1)^{2m} = 2I_0 - 2I_0(1 - q_2)^{2m - \frac{k_2}{2}}. \end{cases}$$

Решения этой системы уравнений получаются численными методами. В частности, решением являются  $2m = 6$ ,  $k_1 = k_2 = 4$ ,  $q_1 \approx 0,15$  и  $q_2 = 0,1$ . Значения  $m$  определяются требуемой длительностью операции.

Получен функционально полный базис интерференционных ОЛЭ второго типа.

### 2.3. Y-волновые элементы

Импульсы, имеющие различные  $\lambda_i$ , не взаимодействуют.

Структуры ОЛЭ, одновременно и независимо выполняющие операции над данными, представленными на различных  $\lambda$ , получаются соответствующим размещением щелей и узлов. Параметры ОЛЭ первого типа и ОЛЭ второго типа, обрабатывающих длины  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, u$  вычисляются соответственно из:

$$\begin{cases} 4I_0(1 - q_1)^{my + m} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2my}; \\ I_0(1 - q_1)^{2my} = 2I_0 - 4I_0(1 - q_2)^{my + m}; \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} 2I_0(1 - q_1)^{2m - \frac{k_1}{2}y} = I_0 - I_0(1 - q_2)^{2m}; \\ I_0(1 - q_1)^{2m} = 2I_0 - 2I_0(1 - q_2)^{2m - \frac{k_2}{2}y}. \end{cases}$$

### 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.

Введем, как показано на рис. 3, в ОЛЭ первого типа еще один волновод – волновод второго уровня. Эту структуру назовем двухуровневым ОЛЭ первого типа.

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

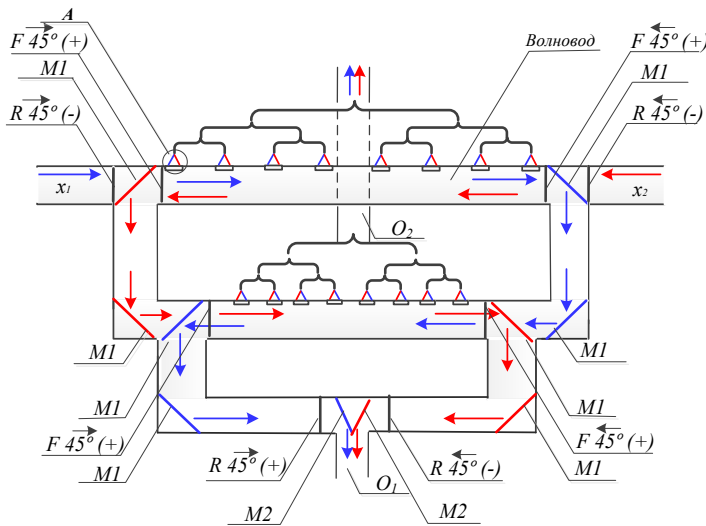


Рис. 3. Структура двухуровневого ОЛЭ первого типа

В волноводе второго уровня ОЛЭ, реализующего  $\&$ , устроены  $2m$  щелей в местах пучностей, образуемых импульсами, поступающими из волновода первого уровня. Выход элемента обозначен  $O_1$ .

В случае  $x_1 = 1, x_2 = 0$  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 составит  $I_{\&} = I_{4m} = I_{2m}(1 - q_1)^{2m} = I_0(1 - q_1)^{4m}$ . Общее энерговыделение в щели волнопроводов первого и второго уровней пропорционально  $I_{4m} = I_0 - I_0(1 - q_1)^{4m}$ .

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 столкновения суммарное значение интенсивности на выходе  $O_1$ , соответствующее логической единице равно  $I_{\&} = 8I_0(1 - q_1)^{4m}$ . Общее энерговыделение в щели пропорционально  $I_{4m} = 2I_0 - 8I_0(1 - q_1)^{4m}$ .

Структура двухуровневого ОЛЭ, реализующего  $\oplus$ , представлена на рис. 3. Выход обозначен  $O_2$ . Значения  $I_{\oplus}$  получаются аналогично вышеизложенному.

Элемент «НЕ» получается из ОЛЭ, реализующего  $\oplus$ , подачей на один из входов сигнала логической «1». Длительности выполнения операций « $\bar{\phantom{x}}$ » и  $\oplus$  совпадают.

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 ОЛЭ первого типа, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения  $f_{\&}(x_2, x_1)$ ,  $f_{\oplus}(x_2, x_1)$  и  $I_{\&}$ ,  $I_{\oplus}$ . Двухуровневые ОЛЭ первого типа

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

Одинаковым логическим константам должны соответствовать одинаковые интенсивности на выходах ОЛЭ. Необходимо:

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

Находим:  $(1 - q_1)^{2m} \approx 0,15$  и  $(1 - q_2)^{2m} = 0,238$ .

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

Приведенные соотношения обобщаются на  $J$  уровней волноводов, где  $J > 1$ , целое. Получаем:

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

При однократном срабатывании, соответствующие логическому «0» и логической «1», значения интенсивности в  $J$ -уровневых ОЛЭ отличаются в  $2 \cdot 2^J$  раз. Длительность выполнения операции составляет не менее  $\tau J$ , где  $\tau$  – длительность выполнения операции одноуровневым элементом.

### ДИНАМИКА ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В результате последовательных операций значения интенсивностей, соответствующие различным логическим константам, могут сближаться. Это обусловлено различием значений выходной интенсивности при подаче на оба входа «1» и подачей на один вход «1», а на другой – «0». Оценим границы значений интенсивности.

Пусть с выхода  $i$ -го элемента импульс поступает на вход  $(i + 1)$  элемента, где  $i = 1, 2, \dots, (h - 1)$ . Обозначим значения интенсивностей «1» и «0» после  $h$  операций на выходе  $h$ -го элемента символами  $I_1^{(\bar{h})}$  и  $I_0^{(\bar{h})}$ . Начальное входное значение, соответствующее логической «1», обозначим  $I_1^{(0)}$ . Для простоты изложения используем  $J$  уровневый элемент «И» первого типа.

В общем виде имеем:

$$\begin{aligned} I_1^{(\bar{h})} &= (2 \cdot 2^J (1 - q_1)^{2mJ})^h \cdot I_1^{(0)}, \\ I_0^{(\bar{h})} &= (1 - q_1)^{2mJ} \left( \sqrt{\tilde{I}_0^{(h-1)}} + \sqrt{\tilde{I}_1^{(h-1)}} \right)^2. \end{aligned}$$

Подставляя значения интенсивностей, получаем:

$$2^{J-1} < \frac{I_1^{(\bar{h})}}{I_0^{(\bar{h})}} < 2 \cdot 2^J.$$

Это справедливо и для ОЛЭ «исключающее ИЛИ» и «НЕ».

Для  $J$ -уровневых ОЛЭ второго типа имеем:

$$\begin{cases} 2 \cdot I_0(1 - q_1)^{(2m - \frac{k_1}{2})J} = I_0(1 - q_2)^{2m(J-1)} - I_0(1 - q_2)^{2mJ}, \\ I_0(1 - q_1)^{2mJ} = 2I_0(1 - q_2)^{(2m - \frac{k_2}{2})(J-1)} - 2 \cdot I_0(1 - q_2)^{(2m - \frac{k_2}{2})J}. \end{cases}$$

Динамические значения интенсивностей удовлетворяют условию:  $\frac{1}{2(1 - q_1)^{\frac{k_1}{2}J}} < \frac{I_1^{(\bar{h})}}{I_0^{(\bar{h})}} < \frac{2}{(1 - q_1)^{\frac{k_1}{2}J}}$ .

#### 4. Пример реализации и применения

Для реализации ОЛЭ могут использоваться оптоволоконные [10], либо планарно-интегральные [9] волноводы, фотонные кристаллы (ФК) [12], графеновые структуры [5]. Для локализации интенсивности в пучностях и узлах необходимо, чтобы размер щели составлял  $\sim 0,1\lambda$ .

Для  $\lambda = 1,55$  мкм этому условию удовлетворяет ФК из кремния [4]. Оценим параметры ОЛЭ из этого ФК.

Значения  $m = 4$  и  $J = 2$  задаем из требований к быстродействию и различию интенсивностей. Из условий идентичности вычисляем  $q_1 = 0,22$  и  $q_2 = 0,15$ .

Щели реализуются линейными дефектами в ФК [4]. Из графика относительных значений интенсивности [4] находим, что  $q_1 = 0,22$  достигается при  $r_d/p = 0,38$ , где  $r_d$  – радиус стержня дефекта;  $p = 0,418$  мкм – постоянная решетки кремния. Получаем  $r_d \approx 160$  нм. Аналогично находим, что  $q_2 = 0,15$  достигается при  $r_d/p = 0,35$ . Получаем  $r_d \approx 120$  нм. Изготовление таких дефектов освоено [13].

Чтобы импульсы в ответственных волноводах не взаимодействовали между собой, расстояние между центрами щелей выберем  $8p = 3,3$  мкм [4]. Размещение 8 щелей требует 26 мкм. Фарадеевские вращатели в ФК требуют 1,5 мкм, другие конструкционные элементы около 1,0 мкм [13]. Длину волновода принимаем  $L=75$  мкм. Полагая скорость света в волноводе  $v = 2 \cdot 10^8$  м/с, находим  $\tau = L/v = 375 \cdot 10^{-15}$  с длительность выполнения операции.

Периодичность регенерации. В процессе выполнения логических операций интенсивность уменьшается. Критичным является уровень интенсивности, соответствующий логической «1», определяющий наличие сигнала. Логический «0» может быть как угодно близок к физическому нулю.

Количество энергии в ОЛЭ из кремния при  $\lambda = 1,55$  мкм и длительности выполнения операции  $\tau = 375 \cdot 10^{-15}$  с составит  $E = ISt \approx 1,23 \cdot 10^{-11}$  Дж, где  $I = \frac{\epsilon_{\text{разр}}}{\tau} = 0,67 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> - пороговое значение интенсивности, превышение которого разрушает волновод,  $\epsilon_{\text{разр}} = 2,5$  Дж/см<sup>2</sup> - лучевая прочность кремния при длительности импульса  $\tau = 300 - 400 \cdot 10^{-15}$  с [14],  $S \approx 4,9 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup> – площадь светового пятна.

Энергия фотона при  $\lambda = 1,5$  мкм составляет:  $E_{\text{ф}} \approx 13,2 \cdot 10^{-20}$  Дж [8]. Количество фотонов в импульсе:  $\frac{E}{E_{\text{ф}}} \approx 0,09 \cdot 10^9$  штук. Для надежной идентификации импульса при  $T = 300$ К достаточно

$10^3$  фотонов [12]. Мощность импульса  $\frac{13,2 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} \cdot 10^3}{375 \cdot 10^{-15}} \approx 0,34$  мВт. Бюджет мощности 38 дБ.

Выполнение одной логической операции уменьшает мощность сигнала не более, чем на 5 дБ.

Без регенерации можно выполнить  $\approx 7$  шт. операций, в течение  $2,5 \cdot 10^{-12}$  с. Для регенерации применяются нелинейные оптические ключи пикосекундного диапазона [15]. Их задействование не скажется на производительности и энергопотреблении устройства.

В процессе выполнения операций импульсы передаются только в волноводах, когерентность сохраняется. Энергия остается в ОЛЭ и задействуется для усиления и регенерации сигнала.

Общие потери энергии определяются потерями в волноводах, эта величина составляет 0,1 дБ/см, и эффективностью ввода излучения в волновод  $\mu \geq 0,9$  [2].

Фотонная вычислительная машина, реализованная из предложенных ОЛЭ, при  $\lambda = 1,5$  мкм, длине волновода  $L = 75$  мкм и указанных значениях энергетических параметров имеет в  $10^3$ – $10^4$  раз большую производительность, по сравнению с электронными аналогами при одинаковых энергозатратах [1].

#### Заключение

Предложены структуры интерференционных логических элементов, образующих полный функциональный базис. Выполняются требования идентичности значений интенсивности, соответствующих логическим константам «0» и «1», вырабатываемых различными элементами в заданные фиксированные интервалы времени.



Масштабирование значений интенсивности логически констант достигается увеличением количества уровней волноводов и сопровождается пропорциональным увеличением длительности выполнения операций.

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

### Литература

1. Степаненко С. А. // Фотонная вычислительная машина. Принципы реализации. Оценки параметров. Доклады академии наук, 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://pandia.ru/77/192/21190.php>
3. Полуэктов А. О. // Оптический логический элемент. Патент РФ 20751061. Опубликовано 10.03.1997г.
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, 48, №2 (2018), 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 403 (2017), P. 185-192.
6. Maria Papaioannou, Eric Plum, João Valente, Edward T. F. Rogers, and Nikolay I. Zheludev // «All-optical multichannel logic based on coherent perfect absorption in a plasmonic metamaterial». APL PHOTONICS, 1, 090801 (2016); doi: 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 411 (2018) 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» 2008г.–С. 1056.
9. Никаноров Н. В., Шандаров С. М. // Волноводная фотоника. ИТМО. Санкт-Петербург, 2008 г.
10. Вербовецкий А. А. // Основы проектирования оптоэлектронных систем связи. М., Радио и связь, 2000г.
11. Поспелов Д. А. // Логические методы анализа и синтеза схем. М.: Энергия, 1974 г., С. 368 .
12. Салех Б., Тейх М. // Оптика и фотоника. Принципы и применения. т.1,2. Долгопрудный: «Интеллект», 2012г.
13. Котляр В. В. // Нанофотоника – манипулирование светом с помощью наноструктур. Компьютерная оптика, 2008, т. 32, №2, С. 119–135.
14. Gallais L., Douti D.-B., Commandre M., Bataviciute G. // Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials. Journal of Applied Physics 117, 223103 (2015), P.223103–6.
15. Гончарова О. В., Демин А. В. // Оптический переключающий элемент. Патент РФ 2096815, опубликован 20.11.1997г.

## A PHOTONIC COMPUTER. OPTICAL LOGIC GATES

*S. A. Stepanenko*

Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

Structures of interference-based logic gates constituting a complete functional unit are proposed. They meet the requirement that the intensity values corresponding to logical constants “0” and “1” generated by different gates in given fixed time intervals be identical.

The intensity values of the logical constants can be scaled up by increasing the number of levels of the waveguides with a proportional increase in the operation execution time.

A digital photonic computer is used as an example to demonstrate the feasibility and application potential of the proposed gates.

*Key words:* photonic machine, optical gate, waveguide.