

# Анализ технических решений по созданию полностью оптических логических элементов

*Приведены критерии оценки физических и структурных принципов создания полностью оптических пассивных логических элементов. На их основе проанализированы известные технические решения. Наиболее перспективной с точки зрения рассматриваемых в работе критериев является технология создания оптических логических элементов на основе микрокольцевых резонаторов.*

**К. И. Балашов, В. В. Шубин**

## Введение

В 1975 г. Гордон Мур сформулировал закон, по которому количество транзисторов, размещенных на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые два года, т. е. идет постоянная миниатюризация полупроводниковых микросхем. Так, если в 1975 г. технологический процесс полупроводникового производства имел разрешение 3 мкм [1], то в 2016 г. компания «Samsung» объявила о начале массового производства первой на рынке «системы на кристалле» по техпроцессу с разрешением 10 нм FinFET [2]. Производители электронных схем будут и дальше стремиться разместить на одном кристалле большее количество транзисторов, уменьшить время, затрачиваемое на выполнение одного переключения в отдельном транзисторе, и снизить потребляемую при этом мощность.

Одним из физических ограничений для дальнейшей миниатюризации электронных схем является принцип Ландауэра, согласно которому логические схемы, не являющиеся обратимыми элементами, должны выделять теплоту в количестве, пропорциональном количеству стипаемых (безвозвратно потерянных) данных. По крайней мере, около  $3 \cdot 10^{-21}$  Дж при  $T = 300$  К должно приходиться на каждую необратимую операцию над битом (при стирании бита информации) [3]. Если в начале 2000-х гг. компьютеры рассеивали примерно в миллион раз больше тепла, чем предсказано принципом Ландауэра, то в начале 2010-х гг. отношение снизилось до нескольких тысяч. Специалисты предсказывают дальнейшее приближение к пределу Ландауэра в течение ближайших десятилетий [3].

На основе транзисторов строятся базовые элементы цифровой схемы, выполняющие элементарные логические операции, – логические элементы микрочипов. Важные характеристики логических элементов – это время и мощность, затрачиваемые на одно переключение в отдельном транзисторе. В работе [4] предполагается, что предел характеристик логических элементов микрочипов ограничен временем переключения 50 пс, что соответствует частоте 20 ГГц, и средней мощностью 500 мкВт, что соответствует энергии 25 фДж на одно переключение. Поэтому даже если размер отдельного элемента будет и далее уменьшаться, частота работы интегральной схемы будет ограничена временем переключения в транзисторах, которое, в свою очередь, практически не уменьшается с уменьшением габаритов транзисторов.

Таким образом, в обозримом будущем предел Ландауэра будет достигнут, а время переключения в отдельном транзисторе и мощность, затрачиваемая на одно переключение, не уменьшатся пропорционально уменьшению его размеров. Однако необходимость в повышении быстродействия при выполнении элементарных логических операций сохраняется.

В связи с этим с 1980-х гг. осуществляются попытки создания оптического компьютера на основе использования оптического излучения в качестве носителя информации [5]. Простейшей единицей оптического компьютера является оптический логический элемент (ОЛЭ). Следует помнить, что все линейные оптические элементы обратимы, т. е. если выход сделать входом и подать на него выходной сигнал, то на входах (которые теперь являются выходами) появятся те же входные сигналы. Логические элементы необратимы: одному выходному сигналу соответствуют три различных комбинации входных сигналов. В этом заключается основная трудность проектирования ОЛЭ. Достижение нелинейной зависимости распространения света путем пространственного смещения выходного волновода в интерференционной картине [6] приводит к большим потерям (3–5 дБ) на одном ОЛЭ, что делает проектирование оптического компьютера практически невозможным.

Поэтому для создания ОЛЭ необходимо использовать оптические эффекты, которые возникают в изотропных материалах в основном из-за свойств нелинейности показателя преломления материала, зависящего от интенсивности излучения. В этом случае показатель преломления записывается в виде суммы [7]

$$m(\omega, |E|^2) = n(\omega) + n_2 |E|^2,$$

где  $\omega$  – оптическая частота;  $|E|^2$  [Вт/см<sup>2</sup>] – интенсивность поля с напряженностью  $E$ ;  $n(\omega)$  – линейный показатель преломления;  $n_2$  [см<sup>2</sup>/Вт] – нелинейный показатель преломления.

Линейный показатель преломления может быть вычислен по формуле Селлмейера [7]

$$n(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2},$$

где  $\omega_j$  – резонансная частота,  $B_j$  –  $j$ -й резонанс.

Нелинейный показатель преломления для изотропных материалов определяется по формуле [7]

$$n_2 = \frac{3\chi_{xxxx}^{(3)}}{8n},$$

где  $\chi_{xxxx}^{(3)}$  – тензор четвертого ранга (для поляризованного излучения).

Нелинейный показатель преломления имеет очень малые значения; например, для кварцевого стекла  $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт [7]. Поэтому для возникновения нелинейных эффектов требуется либо большая мощность, либо большая длина взаимодействия излучения со средой. Кроме того, важно время релаксации параметрического процесса, которое определит предельное быстродействие. На рис. 1 представлены зависимости нелинейного показателя преломления от времени релаксации для различных материалов [8].

Из рис. 1 видно, что показатель  $n_2$  прямо пропорционален времени релаксации в материале. Для получения времени  $10^{-15}$  с подходит только кварцевое стекло, для времен порядка  $10^{-13} - 10^{-14}$  с целесообразнее использовать другие материалы, которые имеют показатель  $n_2$  на три порядка больше, чем кварцевое стекло, например AlGaAs с  $n_2 = 1,41 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/кВт [9].

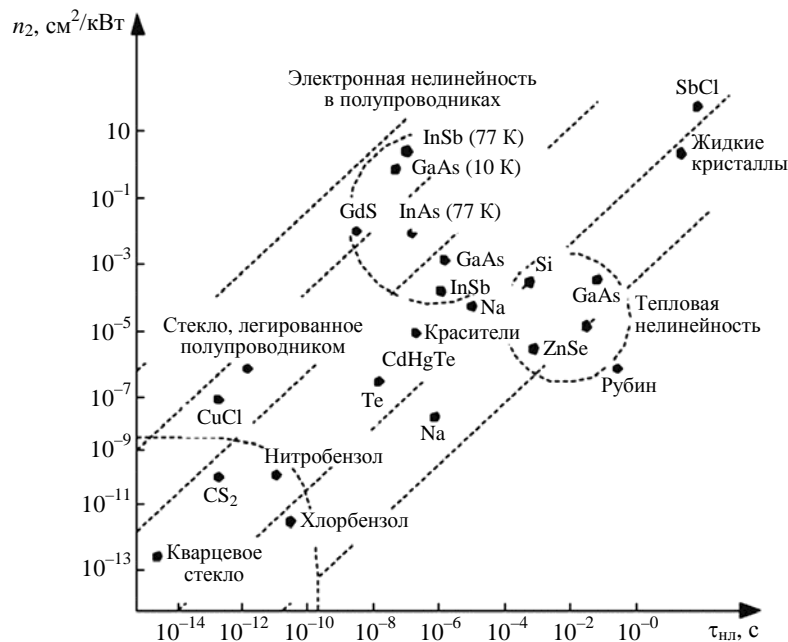


Рис. 1. Зависимости нелинейного показателя преломления от времени релаксации из [8]

Наиболее подробно описан способ создания ОЛЭ с применением трансфазора [10] – аналога электронного транзистора. Трансфазор является бистабильным устройством, у которого зависимость мощности оптического сигнала на выходе от мощности на входе имеет вид гистерезисной петли. Элемент строится с использованием резонатора Фабри – Перо, заполненного нелинейной оптической средой. На вход трансфазора подводят два хорошо отъюстированных лазерных пучка, которые затем фокусируются в одной точке на его передней грани. Один из пучков имеет относительно большую и неизменную интенсивность, второй имеет значительно меньшую интенсивность и может модулироваться по ее значениям. Но достигнуть необходимого эффекта пока удастся только на нелинейных материалах, работающих при очень низких температурах. Кроме того, быстродействие трансфазора ограничено на уровне пикосекунд.

Поэтому необходим другой подход к созданию ОЛЭ, лишенный указанных недостатков. Необходимо разработать критерии оценки физических и структурных принципов создания ОЛЭ, на их основе проанализировать существующие способы создания ОЛЭ и выбрать наиболее подходящий. Этому вопросу посвящена настоящая статья, материалы которой дополняют и развивают в части элементной базы результаты, изложенные в заявке на изобретение Степаненко С. А. «Фотонная вычислительная машина» (№ 2017105677 от 20.02.2017 г., Федеральный институт промышленной собственности).

### ***Критерии оценки физических и структурных принципов создания ОЛЭ***

Перед созданием ОЛЭ необходимо определить критерии оценки физических и структурных принципов, на которые нужно ориентироваться. Авторы предлагают следующие девять критериев:

- 1) функционально полный логический базис;
- 2) отсутствие в оптических цепях медленных физических процессов;

- 3) минимальное время выполнения одной логической операции;
  - 4) минимальная дисперсия оптических сигналов;
  - 5) минимальные оптические потери в ОЛЭ;
  - 6) максимальное отношение амплитуд сигналов *логическая единица* и *логический ноль\**;
  - 7) минимальные дополнительные требования к излучению;
  - 8) возможность последовательно-параллельного соединения элементов;
  - 9) возможность интегрального исполнения ОЛЭ.
- Рассмотрим более подробно каждый из этих критериев.

### Функционально полный логический базис

Функционально полный логический базис позволяет реализовывать любые цифровые устройства, из которых можно спроектировать арифметико-логические устройства, систему меж-процессорных обменов и другие компоненты оптического компьютера. В табл. 1 приведены функции основных логических элементов: ИЛИ (OR) ИЛИ-НЕ (NOR), исключающее ИЛИ-НЕ (NXOR), исключающее ИЛИ (XOR), И (AND), И-НЕ (NAND), НЕ (NOT). Для функционально полного логического базиса достаточны наборы из двух элементов: AND и NOT или OR и NOT или из одного элемента: NAND или NOR [11]. Для удобства реализации лучше иметь все основные логические элементы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Функции логических элементов

Входы		Выход						NOT	
A	B	OR	NOR	NXOR	XOR	AND	NAND	Вход	Выход
0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1	0	1	–	–
1	1	1	0	1	0	1	0	–	–

### Отсутствие в оптических цепях медленных физических процессов

Требование отсутствия физических преобразований оптического сигнала в другие формы энергии и обратно обусловлено тем, что эти процессы сильно снижают скорость работы. Самая большая скорость, которая может быть достигнута, – скорость света в среде. При идеальных условиях время изменения состояния поляризации сигнала при прохождении через изотропный нелинейный материал составляет 2–4 фс [7]. Использование электрооптических, акустооптических, магнитооптических и других преобразований в оптических цепях нецелесообразно, так как они происходят за время более 1 пс. Другие способы нелинейной поляризации (кроме электронной) также замедлят работу.

\* Для краткости в дальнейшем сигнал *логическая единица* будем обозначать «1», сигнал *логический ноль* – «0».

**Минимальное время выполнения одной логической операции**

Время  $T_0$  выполнения одной логической операции ОЛЭ может быть определено по формуле

$$T_0 = \frac{\ln(w, |E|^2)}{c},$$

где  $l$  [м] – максимальная длина пути оптического сигнала в элементе;  $c$  [м/с] – скорость света в вакууме;  $n(w, |E|^2)$  – показатель преломления.

Таким образом, длина оптического пути в элементе ограничивает время выполнения одной логической операции. В табл. 2 приведены зависимости длины пути  $l$  от  $T_0$  при двух показателях преломления, характерных для кварцевого стекла и нелинейных оптических материалов, равных 1,5 и 3,0 соответственно.

Таблица 2

Длины оптического пути в ОЛЭ в зависимости от времени выполнения одной логической операции

$T_0$	$l$	
	$n(w,  E ^2) = 1,5$	$n(w,  E ^2) = 3,0$
10 пс	2 мм	1 мм
1 пс	200 мкм	100 мкм
100 фс	20 мкм	10 мкм
35 фс	7 мкм	3,5 мкм
10 фс	2 мкм	1 мкм

Время выполнения одной логической операции будет определять максимальную длительность оптического информационного сигнала  $T_{и}$ , которая должна удовлетворять условию

$$T_{и} < T_0.$$

Делать длительность информационного сигнала намного короче времени выполнения одной логической операции не имеет смысла, достаточно лишь учесть период следования информационных сигналов для исключения их взаимовлияния.

Частота повторения информационных сигналов будет определяться временем выполнения одной логической операции  $T_0$ , способом физического кодирования и способом модуляции. Необходимо, чтобы информационные сигналы не накладывались друг на друга. Для этого нужно соблюдать межимпульсный интервал. Так, при кодировании RZ (Return to Zero) и способе модуляции ООК (On-Off Key) максимальная частота повторения информационных импульсов составит

$$F_{\max} = \frac{1}{2T_0}.$$

Длина пути в ОЛЭ, скорее всего, будет находиться в диапазоне от 10 до 100 мкм, следовательно, время выполнения одной логической операции не может быть менее 0,1–1 пс. Более протяженные ОЛЭ приведут к увеличению времени выполнения одной логической операции, а более короткие получить физически затруднительно, используя длину волны 1,55 мкм.

Таким образом, время выполнения одной логической операции во многом определяет другие параметры оптического компьютера – длительность и максимальную частоту следования информационных сигналов.

### ***Минимальная дисперсия оптических сигналов***

При использовании коротких оптических импульсов и длинных оптических цепей будет иметь значение уширение импульса за счет дисперсии. Две составляющие дисперсии, линейная и нелинейная, могут быть охарактеризованы длинами, начиная с которых влияние дисперсионных и нелинейных эффектов становится важным для эволюции импульса вдоль длины световода [7]:

– длина оптической цепи для линейной дисперсии

$$L_D = \frac{T_{\text{и}}^2}{|\beta_2|},$$

где  $T_{\text{и}}$  – длительность импульса по уровню  $1/e$ ;  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии групповых скоростей;

– длина оптической цепи для нелинейной дисперсии

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma W},$$

где  $W$  [Вт] – мощность информационного импульса;  $\gamma$  [Вт<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup>] – коэффициент нелинейности, определяемый по формуле

$$\gamma = \frac{2\pi w n_2}{c A_{\text{эф}}},$$

где  $n_2$  [км<sup>2</sup>/Вт] – нелинейный показатель преломления;  $w$  [рад/с] – частота оптического излучения;  $c$  [км/с] – скорость света в вакуум;  $A_{\text{эф}}$  [км<sup>2</sup>] – эффективная площадь сечения ОЛЭ.

Наилучшим способом устранения влияния дисперсии является солитонный режим, при котором импульс (солитон) сохраняет свою форму и спектр при распространении. При определенных значениях мощности и длительности импульса в среде с аномальной (отрицательной) дисперсией групповых скоростей достигается солитонный режим распространения. Условием солитонного режима первого порядка является равенство длин  $L_D = L_{NL}$  [7], т. е.

$$\frac{T_{\text{и}}^2}{|\beta_2|} = \frac{1}{\gamma W},$$

что требует определенной мощности импульса солитона при заданной длительности:

$$W = \frac{|\beta_2|}{\gamma T_{\text{и}}^2}.$$

Связь между длительностью и мощностью солитона требует дополнительного внимания при проектировании оптических цепей из логических элементов.

### **Минимальные оптические потери в ОЛЭ**

Минимальные оптические потери в ОЛЭ требуются для увеличения длины оптической цепи до регенерации оптических сигналов. В линейных оптических цепях длина пути определяется запасом по мощности и дисперсией оптических сигналов. Запас по мощности (бюджет) оптической цепи составляет

$$B = W_0 - W_{\text{п}}(\text{BER}) \text{ [дБ]},$$

где  $W_0$  [дБм] – мощность излучения лазерного источника;  $W_{\text{п}}(\text{BER})$  [дБм] – порог чувствительности оптического приемника при заданном коэффициенте ошибок BER [12].

Потери в оптической цепи ОЛЭ могут быть вычислены по формуле

$$A = A_{\text{в}} + A_{\text{м}} + NA_3 + \alpha L + pA_{\text{р}} + A_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{в}}$  [дБ] – потери при вводе излучения от источника;  $A_{\text{м}}$  [дБ] – потери в модуляторе оптического излучения;  $A_3$  [дБ] – потери в одном логическом элементе;  $\alpha$  [дБ/мм] – коэффициент затухания в соединительных линиях;  $L$  [мм] – длина соединительных линий;  $p$  – количество разветвлений в оптической цепи;  $A_{\text{р}}$  [дБ] – потери на одном разветвителе;  $A_{\text{п}}$  [дБ] – потери при приеме.

Потери не должны превышать бюджет, т. е.  $A \leq B$ . При этом нужно учитывать, что для поддержания нелинейности в ОЛЭ необходима достаточно большая интенсивность оптического излучения, поэтому бюджет будет определяться требованием поддержания нелинейных свойств материала.

Из (1) следует, что максимальное количество последовательно соединенных ОЛЭ в пассивной оптической цепи составит

$$N_{\text{max}} = \frac{W_0 - W_{\text{п}}(\text{BER}) - A_{\text{в}} - A_{\text{м}} - \alpha L - pA_{\text{р}} - A_{\text{п}}}{A_3}. \quad (2)$$

Таким образом, предельное количество последовательно соединенных ОЛЭ будет определяться потерями на одном ОЛЭ, потерями в оптической цепи, мощностью излучения лазерного источника и чувствительностью оптического приемника.

Как видно из формулы (2), для получения максимального количества последовательно соединенных ОЛЭ потери на один ОЛЭ должны быть минимальными.

### **Максимальное отношение амплитуд сигналов «1» и «0»**

При приеме оптических сигналов на выходе фотонного вычислителя должен быть обеспечен требуемый коэффициент ошибки (BER). Как правило, его значение менее  $10^{-9}$  [12]. При проектировании используют расчетное значение, т. е. вероятность появления ошибки, которая учитывает только основную составляющую ошибок – шум.  $Q$ -фактор – параметр, который непосредственно отражает качество сигнала цифровой системы передачи, вычисляется по формуле

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0},$$

где  $\mu_1$  – амплитуда сигнала «1»;  $\mu_0$  – амплитуда сигнала «0»;  $\sigma_1$  – среднее квадратическое значение шума при приеме сигнала «1»;  $\sigma_0$  – среднее квадратическое значение шума при приеме сигнала «0».

При амплитудной манипуляции и потенциальном кодировании зависимость вероятности ошибки от  $Q$ -фактора будет такой же, как в волоконно-оптических системах передачи. Эта зависимость приведена на рис. 2 [12]. Способ манипуляции должен обеспечивать максимальное отличие сигналов «0» и «1». При способе модуляции ООК (сигнал «1» соответствует импульсу излучения, «0» – отсутствию излучения) для обеспечения работы с  $BER \leq 10^{-9}$  достаточно, чтобы отношение амплитуд сигналов «1» и «0» было не менее 10 дБ. Оценку коэффициента ошибок целесообразно проводить по «глаз»-диаграмме, пример которой приведен на рис. 3 (см. также цв. вкл.) [12].



Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от  $Q$ -фактора

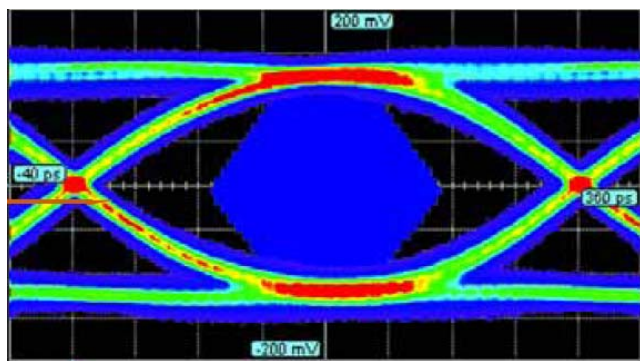


Рис. 3. «Глаз»-диаграмма выходных оптических сигналов

### ***Минимальные требования к оптическому излучению***

Из анализа технических решений следует, что при создании ОЛЭ необходимо минимизировать требования к оптическому излучению. К таким требованиям следует отнести:

- полную когерентность входных сигналов: равенство амплитуд, плоскостей поляризации и длин оптических путей на входах каждого элемента от одного источника излучения;
- поляризацию: совпадение (ортогональность) плоскостей поляризации на входах каждого элемента;



- высокую мощность оптических сигналов на входах и выходах;
- совпадение длин волн логических сигналов, сигналов синхронизации и др.;
- присутствие дополнительных сигналов: мощного сигнала для получения нелинейных эффектов, сигнала синхронизации, сигнала постоянной мощности и др.;
- равенство длин оптических путей.

Очевидно, что исключить все требования невозможно. Но требование по когерентности сигналов на входах всех ОЛЭ является самым жестким, так как практически делает невозможным создание оптического компьютера.

### ***Возможность последовательно-параллельного соединения и интегрального исполнения***

ОЛЭ должны соединяться в последовательно-параллельные оптические цепи с помощью оптических волноводов без дополнительных элементов. Логические элементы должны допускать возможность интегрального исполнения по единой технологии, которая может быть реализована на практике. Для этого количество компонентов, входящих в элемент, и их габариты должны быть минимально возможными. Потери в соединительных линиях должны быть сравнимы с потерями в одном ОЛЭ.

Предлагаемые авторами предельные параметры для выбора схемы реализации ОЛЭ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры для выбора схемы ОЛЭ

Минимальный набор элементов	Время логической операции	Потери на ОЛЭ	Отношение амплитуд сигналов «1» и «0»	Дополнительные требования	Затухание в волноводах
1 – AND, NOT 2 – OR, NOT 3 – NAND 4 – NOR	≤10 пс	≤0,05 дБ	≥10 дБ	Отсутствие когерентности	≤0,1 дБ/мм

### ***Выбор физических и структурных принципов создания полностью ОЛЭ***

В статье [13] приведена классификация полностью ОЛЭ по признаку использования в качестве нелинейного оптического элемента полупроводникового оптического усилителя (SOA). Из классификации [13] видно, что SOA ограничивает тактовую частоту ОЛЭ на уровне 40 ГГц, что обусловлено физическим процессом усиления оптических сигналов. Опубликовано много предложений по созданию ОЛЭ на связанных волноводах на основе оптического эффекта Керра [14–18]. Но из-за малости нелинейного коэффициента преломления оптическая длина для преобразования фазы оптического сигнала получается достаточно большой (до 12 мм), что также ограничивает быстродействие ОЛЭ на уровне десятков пикосекунд. По причине недостаточного быстродействия и больших потерь не подходят ОЛЭ на основе интерферометров по схеме Юнга, Маха – Цендера и Саньяка [4, 13, 18–22]. ОЛЭ на фотонных кристаллах [23–25], с кодированием по положению плоскости поляризации [26, 27] имеют ограничения по быстродействию и возмож-

ности интегрального исполнения. Элементы с использованием различных длин волн [28, 29], основанные на четырехволновом смешении, не позволяют строить длинные цепи из ОЛЭ.

Ряд статей [30–38] посвящен созданию ОЛЭ на основе микрокольцевых резонаторов (МКР), в которых «1» кодируется *светлым* солитоном, а «0» – *темным*. Предлагаемый подход, по мнению авторов, выглядит наиболее перспективным для создания полностью ОЛЭ по следующим причинам.

МКР представляет собой два параллельных прямых волновода и расположенный в непосредственной близости между ними резонатор, который выполнен в виде кольцевого волновода (рис. 4) [39]. МКР передает синфазные сигналы с порта «Input» на порт «Drop» и с порта «Add» на порт «Throughput» с заданными коэффициентами ответвления  $k_1$  и  $k_2$ , причем выходные сигналы имеют сдвиг по фазе ( $-\pi$ ) относительно входных сигналов. Особенности МКР являются их малые размеры (диаметр около 1,5 мкм) и при этом достаточно малые потери мощности сигнала:  $5 \text{ см}^{-1}$  (21,71 дБ/см) [34]. Для поддержания оптического поля в резонаторе необходима большая разница показателей преломления между световедущей сердцевиной и оптической оболочкой. Поэтому такие резонаторы создают путем травления в фосфиде и арсениде галлия (GaAsP, GaAs), а также других материалах и изготавливают в интегральном виде. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки может составлять более 1,0 (для обычных оптических волокон 0,01–0,03). Площадь активной площадки волновода может быть от 0,1 до 0,5 мкм<sup>2</sup>. При этом затухание в волноводах составляет 0,05–0,1 дБ/мм [31].

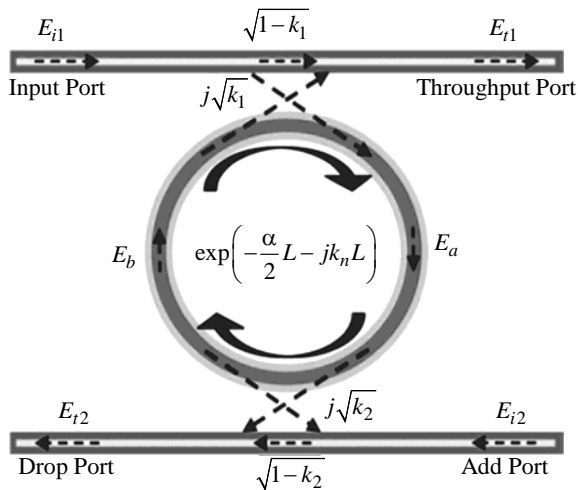


Рис. 4. Схема оптического кольцевого резонатора [39]

При использовании нелинейного взаимодействия светлых и темных солитонов на основе МКР можно реализовать различные логические элементы (AND, OR, NAND, XOR, NXOR, NOR) и выполнение нескольких логических функций за один такт [32]. Длительностью такта является время прохождения солитоном двух последовательно соединенных МКР.

Таким образом, применение МКР с темными и светлыми солитонами позволяет создать необходимый функционально полный логический базис для реализации оптического компьютера.

Например, на рис. 5 представлены схемы МКР и ОЛЭ NAND [31]. На рис. 6 приведены результаты компьютерного моделирования ОЛЭ: таблица истинности NAND и выходные сигналы при различных комбинациях входных сигналов  $A$  и  $B$  [31]. Моделирование проводилось при длительности солитонов 35 фс. Другие параметры ОЛЭ:  $k_1 = k_2 = 0,05$  (см. рис. 4),  $R_{ad} = 1,51 \text{ мкм}$ ,  $A_{ef} = 0,25 \text{ мкм}$ ,  $\alpha = 0,05 \text{ дБ/мм}$ ,  $n = 3,14$  (GaAsP и InP).

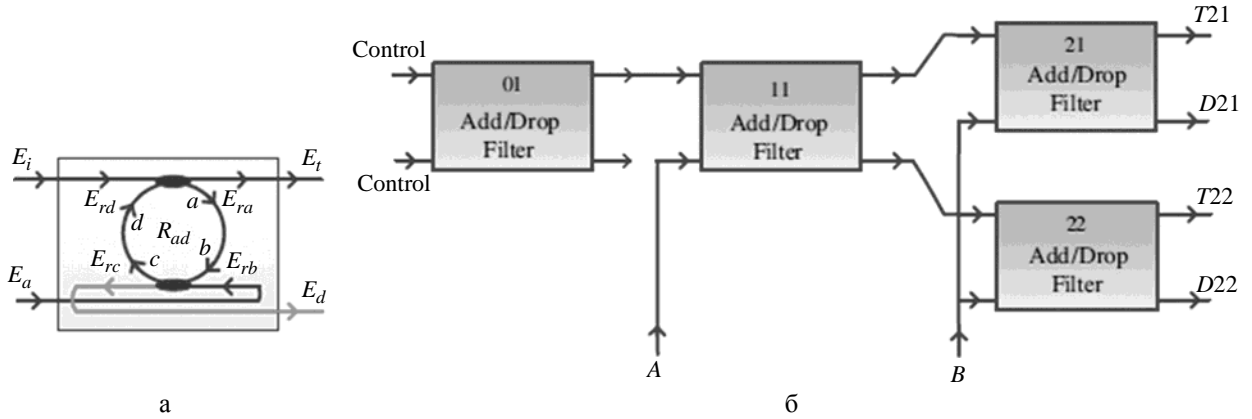


Рис. 5. Схемы МКР (а) и ОЛЭ NAND (б)

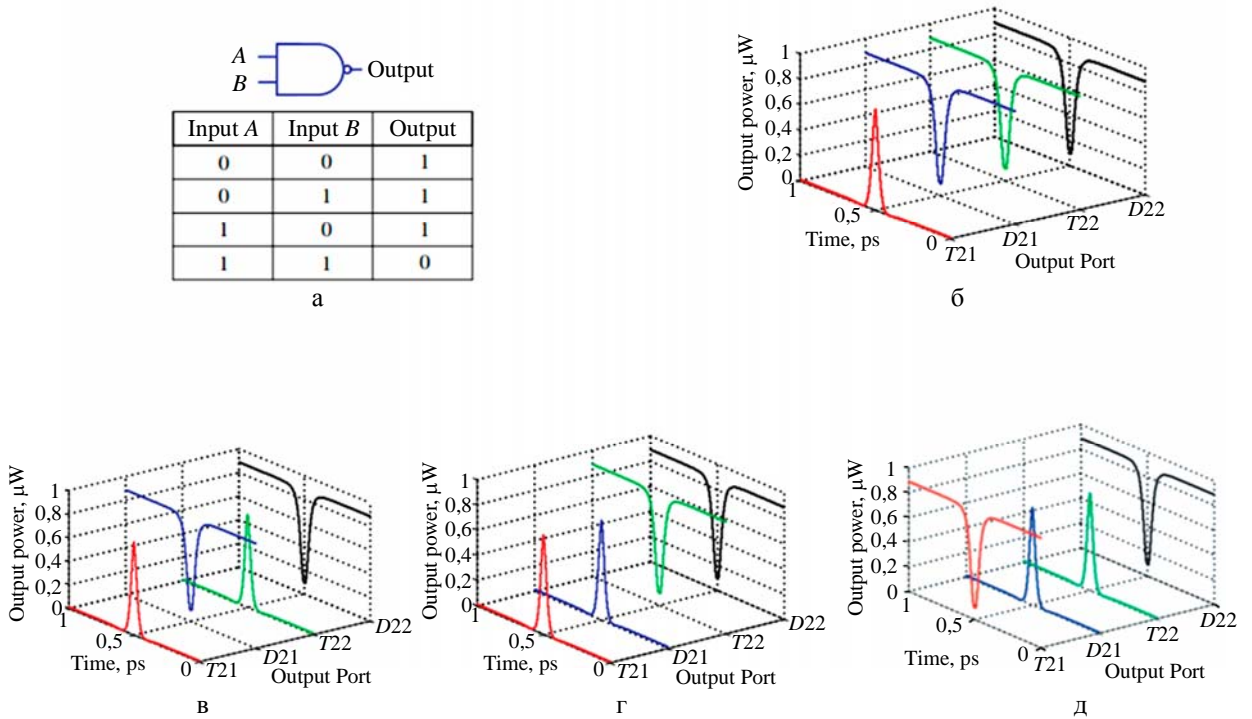


Рис. 6. Таблица истинности NAND (а), выходные сигналы при входных сигналах  $A$  и  $B$ :

«00» (б), «01» (в), «10» (г), «11» (д)

Есть сообщения [38] о создании нанокольцевых резонаторов с радиусом меньше длины волны (300–700 нм), что сможет обеспечить выполнение одной логической операции за время около 50 фс. Правда, в таких резонаторах будут большие изгибные потери (более  $100 \text{ см}^{-1}$ ), хотя и при меньшей длине кольца [38].

Режим передачи солитонов позволяет не учитывать дисперсию в волноводах, так как подразумевается, что уширение импульса из-за нелинейных эффектов компенсируется отрицательной дисперсией в волноводе. Солитон при своем распространении не претерпевает существенных из-

менений формы и спектра. Также для эффективного взаимодействия солитонов требуется их одинаковая линейная поляризация и не требуется когерентности. При нелинейном взаимодействии солитонов должно учитываться расстояние между ними, разности амплитуд (длительностей) и фаз [7].

Отношение амплитуд сигналов «1» и «0» большого значения не имеет, так как кодирование осуществляется по форме солитона (светлый солитон соответствует «1», темный – «0»), что является, по существу, дифференциальным кодированием. Значение имеет только отношение *сигнал/шум* для амплитуд светлого и темного солитонов.

Для интегрального исполнения недостатком предлагаемых схем является разнонаправленность входных и выходных оптических шин, что потребует изменения конфигурации предлагаемых в статьях ОЛЭ. Также остается открытым вопрос о возможности существования одновременно в одном материале на одной длине волны темных и светлых солитонов. Так, для существования светлого солитона необходимо, чтобы коэффициент дисперсии групповых скоростей принимал отрицательное значение, а для существования темного солитона – положительное. Также темный солитон по своей сути является «провалом» на фоне постоянной интенсивности, что требует дополнительного расхода энергии. Эти вопросы требуют дальнейшего изучения.

## Выводы

Разработанные критерии оценки физических и структурных принципов создания ОЛЭ и анализ на их основе известных технических решений позволяют утверждать, что наиболее перспективным способом создания ОЛЭ, удовлетворяющим всем выдвинутым требованиям, является применение элементов на основе МКР. На основе МКР удастся реализовать необходимый функционально полный логический базис. МКР легко соединяются как последовательно, так и параллельно, образуя древовидную структуру. Технология изготовления МКР освоена и применяется для создания многорезонаторных фильтров, используемых в волоконно-оптических системах передачи с волновым уплотнением (WDM) [36].

Недостатком предлагаемых схем является разнонаправленность входных оптических шин, что требует доработки предлагаемых схем ОЛЭ для интегрального исполнения. Кроме того, необходимо дополнительное изучение возможности использования оптических солитонов: одновременное существование темных и светлых солитонов, их взаимодействие в нелинейной среде, влияние зависимости амплитуды и длительности при проектировании длинных цепей.

## Список литературы

1. Технологический процесс в электронной промышленности [Электронный ресурс]. – <http://wikipedia.ru>.
2. Короткова Т. Samsung начала массовое производство системы System-on-Chip по техпроцессу 10 нм FinFET [Электронный ресурс]. – [http://www.cnews.ru/news/line/2016-10-17\\_samsung\\_nachala\\_massovoe\\_proizvodstvo\\_systemy](http://www.cnews.ru/news/line/2016-10-17_samsung_nachala_massovoe_proizvodstvo_systemy).
3. Принцип Ландауэра [Электронный ресурс]. – <http://wikipedia.ru>.
4. Meindl J. D. Low power microelectronics: retrospect and prospect // Proc. IEEE. 1995. Vol. 83, N 4. P. 619–635.

5. Начало новой эры [Электронный ресурс]. – <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/115638>.
6. Патент на полезную модель № 2075106 РФ, МПК G02F3/00. Оптический логический элемент / А. О. Полуэктов (10.03.1997) [Электронный ресурс]. – <http://bankpatentov.ru>.
7. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М: Мир, 1996.
8. Серба П. В. Нелинейные процессы в электронике и оптике. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010.
9. Dolgaleva K., Chan W., Qian L. et al. Broadband self-phase modulation, cross-phase modulation and four-wave mixing in 9-mm long AlGaAs waveguides // *Optics Letters*. 2010. Vol. 35, Issue 24. P. 4093–4095.
10. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света. – М.: Мир, 1988.
11. Логические элементы [Электронный ресурс]. – <http://wikipedia.ru>.
12. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
13. Singh P., Tripathi D. K., Jaiswal S., Dixit H. K. All-optical logic gates: designs, classification and comparison [Electronic resource]. – <http://dx.doi.org/10.1155/2014/275083>.
14. Andrews J. T., Choubey R., Choudhary O. P. et al. Demonstration of All-Optical NAND Logic Gate Using Photonic Integrated Circuits [Electronic resource]. – <http://comsol.ru/paper>.
15. Dehdast M., Baheami A. Design of all-optical simultaneous AND, NAND, OR and NOR logic gates using phase-based control of three coupled waveguides // *Photonic Network Communications*. 2017. Vol. 33, Issue 2. P. 136–142.
16. Jenkins B. K., Sawchuk A. A., Strand T. C. et al. Sequential optical logic implementation // *Appl. Optics*. 1984. Vol. 23, Issue 19. P. 3455–3464 [<http://doi.org/10.1364/AO.23.003455>].
17. Фотоника: разработан полностью оптический коммутатор [Электронный ресурс]. – [http://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/fotonika\\_razrabotan\\_polnostyu\\_opticheskiy\\_kommutator](http://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/fotonika_razrabotan_polnostyu_opticheskiy_kommutator).
18. Sekartedjo A., Hatta A. M., Sawitri D. et al. All-optical logic gates based on multimode interference (MMI) structure [Electronic resource]. – <http://digilib.its.ac.id/TTS-Article-3400012000446/18444>.
19. Лысенко Г. Л., Тужанский С. Е., Альравашдех М. Фотонные логические элементы на основе фазово-синхронизированных массивов СС-VCSEL [Электронный ресурс]. – <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/3255/310.pdf>.
20. Wu Y.-D., Shin T.-T., Chen M.-H. New all-optical logic gates based on the local nonlinear Mach–Zehnder interferometer [Electronic resource]. – <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18521155>.
21. Wu J.-W., Sarma A. R. Ultrafast all-optical XOR logic gate based on a symmetrical Mach–Zehnder interferometer employing SOI waveguides [Electronic resource]. – <http://www.elsevier.com/locate/optcom>.
22. Zheng Q. On the SOA based MZI all-optical logic gates for all-optical networks [Electronic resource]. – <http://arxiv.org/abs/1205.0268>.
23. Husko C., Vo T. D., Corcoran B. et al. Ultracompact all-optical XOR logic gate in a slow-light silicon photonic crystal waveguide // *Optics Express*. 2011. Vol. 19, Issue 21. P. 20681–20690.
24. Noshad M., Abbasi A., Ranjbar R., Kheradmand R. Novel all-optical logic gates based on photonic crystal structure [Electronic resource]. – <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/350/1/012007>.
25. Леонов А. А., Сергеев А. А., Номоконова Н. Н. Оптические логические элементы на основе нанокompозитных материалов [Электронный ресурс]. – <http://science.vvsu.ru/publications-and-patents/publications/digest/details/material/10890640>.

26. Непейвода Н. Н., Цветков А. А., Харлевич М. М. Опыт проектирования кристаллографических вычислительных элементов. – М: ИПС РАН, 2015.
27. Zaghoul Y. A., Zaghoul A. R. M., Adibi A. Passive all-optical polarization switch, binary logic gates and digital processor // Optics Express. 2011. Vol. 19, N 21. P. 20332–20346.
28. Hedecvist P. O., Bhardwaj A., Vahala K., Anderson H. Advanced all-optical logic gates on spectral bus // Optical Society of America. 2001. Vol. 40, N 11. P. 1761–1766.
29. Vahala K., Paiella R., Hunziker G. Ultrafast WDM Logic // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 1997. Vol. 3, N 2. P. 698–701.
30. Luangxaysana K., Phongsanam P., Mitatha S. et al. Novel all-optical flip-flop using dark-bright soliton conversion control // Information Technology Journal. 2012. N 11. P. 1470–1476.
31. Soysouvanh S., Phongsanam P., Luangxaysana K. et al. All optical logic NAND gate using dark-bright soliton conversion control // PIERS Proc. Kuala Lumpur, MALAYSIA, March 27–30, 2012. P. 177–180.
32. Jalil M. A., Amiri I. S., Teeka C., Ali J., Yupapin P. All-optical logic XOR/XNOR gate using microring and nanoring resonators // Physics Express. 2011. Vol. 1. P. 15–22.
33. Luangxaysana K., Phongsanam P., Mitatha S. et al. All-optical logic and arithmetic operation using soliton control for tree architecture use // Information Technology Journal. 2012. N 11. P. 1227–1234.
34. Pornsuwancharoen N., Fujii Y., Srinuanjan K., Yapapin P. P. A novel system of the simultaneous trapping of dark-bright solitons within a nano-waveguide system // Optik. 2010. Vol. 121, Issue 20. P. 1863–1868.
35. Bogaerts W., Heyn P. De., Van Vaerenbergh T. et al. Silicon microring resonators // Laser Photonics Rev. 2012. Vol. 6, Issue 1. P. 47–73.
36. Xu Q., Lipson M. All-optical logic based on silicon microring resonators // Optics Express. 2007. Vol. 15, N 3. P. 924–929.
37. Amiri I. S., Babakhani S., Vahedi G. R., Ali J., Yupapin P. P. Dark-bright solitons conversion system for secured and long distance optical communication // J. of Appl. Phys. 2012. Vol. 2, Issue 1. P. 43–48.
38. Xu Q., Fattal D., Beausoleil R. G. Silicon microring resonators with 1,5  $\mu\text{m}$  radius // Optics Express. 2008. Vol. 16, N 6. P. 4309–4315.
39. Sadegh A., Alavi S. E., Mahdaliza I. S. Theoretical background of microring resonator systems and soliton communication [Electronic resource]. – <http://www.springer.com/978-981-287-160-2>.

## **Examination of Engineering Solutions on the Design of Completely Optical Logical Components**

K. I. Balashov, V. V. Shubin

*The paper gives criteria for assessing the physical and structural principles of designing completely optical passive logical components. The criteria were used to examine the known engineering solutions. From viewpoint of meeting the criteria, the technology of logical components based on micro-ring resonators seems to be promising.*