

## SOLUTION OF 3D ELECTRODYNAMICS PROBLEMS ON UNSTRUCTURED GRIDS WITH GODUNOV'S METHOD

*I. V. Sobolev*

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

The paper discusses the solution of Maxwell's equations and equations of the ideal magnetic hydrodynamics using Godunov's method on unstructured grids.

*Key words:* Maxwell's equations, equations of ideal magnetic hydrodynamics, Godunov's method, unstructured grids.

УДК 004.272.44:004.382.2+535.2

## ФОТОННЫЙ КОМПЬЮТЕР. СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ. ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ

*С. А. Степаненко*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Предложены структура и принципы реализации фотонного компьютера. В основе его функционирования – эффекты взаимодействия когерентных систем световых волн, порождаемых лазерным источником.

Получены оценки значений производительности, потребляемой энергии, физических размеров; эти оценки показывают возможные преимущества фотонного компьютера по сравнению с электронным.

*Ключевые слова:* фотонный процессор, оптический логический элемент, управление потоком данных.

### Введение

Для решения постоянно возникающих актуальных задач требуются вычислительные машины с максимальной производительностью. Она измеряется количеством операций, выполняемых в единицу времени.

Современные вычислительные машины содержат миллиарды электронных транзисторов размером не более 14 нм, выполняют  $\sim 10^{17}$  оп/с, потребляют десятки МВт, занимают тысячи м<sup>2</sup>.

Дальнейшее уменьшение размеров транзисторов для наращивания производительности приводит к тому, что взаимодействие между ними будет сопровождаться квантовыми эффектами. Вычислительные машины на основе таких эффектов называются квантовыми компьютерами. Они исследуются последние 30 лет, перспективы их реализации пока неопределенны [1].

Поэтому актуальна предлагаемая ниже вычислительная машина, в основе функционирования которой – эффекты взаимодействия когерентных систем световых волн, порождаемых лазерным излучением [2]. Носителями излучения являются фотоны, отсюда название – фотонный компьютер.

Фотонный компьютер, в отличие от аналогов [3, 4], оперирует только световым представлением информации. Это позволяет получить, как будет показано, значения производительности и энергоэффективности лучше достигаемых применением электронных технологий.

### Алгоритм функционирования и структура фотонного компьютера

Записанная на языке высокого уровня программа транслируется электронной вычислительной машиной (ЭВМ) в электронную форму программы фотонного компьютера, которая затем преобразуется в световую форму и выполняется фотонным процессором. По окончании вычислений результат преобразуется устройством сопряжения в электронную форму и поступает в ЭВМ.

Структура фотонного компьютера представлена на рис. 1.

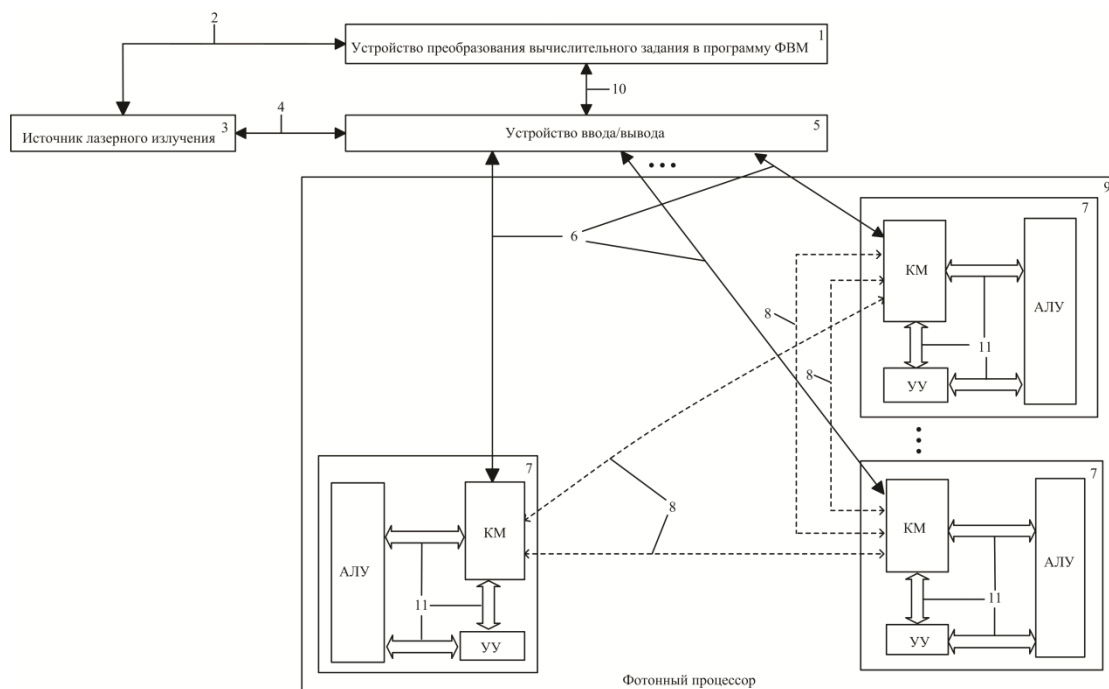


Рис. 1. Структура фотонного компьютера

Выполнение вычислительного процесса начинается пусковым воздействием устройства 1, передаваемым по каналу 2 в источник 3 лазерного излучения. Генерируемое источником 3 излучение по оптическому каналу 4 поступает в устройство 5 ввода/вывода, где делится на световые лучи, количество которых равно количеству бит (разрядов), одновременно вводимых по оптическим каналам 6 в процессорные элементы (ПЭ) 7, объединенные каналами 8 в фотонный процессор 9. Далее в результате взаимодействия этих лучей в устройстве 5 с электронным представлением исходной информации, вводимым по электронному каналу 10 из устройства 1 (в качестве которого можно применять ЭВМ), получается световая форма программы, поступающая по каналам 6 на выполнение в ПЭ 7. Они содержат арифметико-логические устройства (АЛУ), коммутаторы (КМ) и устройства управления (УУ), объединенные оптическими каналами 11. Вычислительный процесс является последовательностью взаимодействий световых лучей в пассивных оптических логических элементах (ОЛЭ) [5–7], из которых реализованы ПЭ 7.

Функции ОЛЭ идентичны функциям электронных логических элементов [8]. Это позволяет задействовать в фотонном компьютере архитектурные реализации АЛУ, КМ и УУ, известные из электронной вычислительной техники; для синхронизации возможно использование оптических линий задержки.

Процессорные элементы в фотонном процессоре соединены каналами  $\delta$  в мультипроцессорную среду, имеющую любую известную топологию, например, 3D-тор,  $\Gamma^n$ -гиперкуб и др.[9].

Общее количество выполняемых операций определяется либо бюджетом мощности [10], либо длиной когерентности [11].

После исчерпания бюджета мощности осуществляется регенерация информации. После достижения длины когерентности информация возвращается по каналам  $\delta$  в устройство 5, где преобразуется в электронную форму и затем вновь в световую когерентную форму, передаваемую в ПЭ.

### Принципы выполнения вычислений

Информация в световой форме постоянно перемещается в пространстве. Чтобы исключить ее задержки и потери мощности необходимо:

- выполнять операции по готовности операндов без обращения в память согласно дисциплине управления от потока данных (data flow) [8];
- обрабатывать информацию по бесконфликтным маршрутам [9], задействуя в определенный, заранее известный интервал времени только свободные процессорные элементы и каналы.

Вычисляемое выражение представляется польской инверсной записью [8], на основе которой строится ярусно-параллельная форма (ЯПФ) алгоритма [12]; вершины одного яруса ЯПФ соответствуют командам, выполняемым независимо (параллельно) в течение одного и того же интервала  $t$ .

Из ЯПФ алгоритма получается процессорный граф. Его вершины соответствуют ПЭ, выполняющим операции в интервалы времени  $t$ . Они соединены ребрами, принадлежащими бесконфликтным маршрутам из каналов  $\delta$ . По этим каналам ПЭ обмениваются идентификаторами – кодами операций, операндами и синхронизирующими символами, которые обозначаются  $\emptyset$ . Для выполнения операций назначаются ПЭ, свободные в интервал  $t$  от других заданий; эти ПЭ определяются при подготовке программы в устройстве 1 на основе количества ПЭ, топологии их соединения, принадлежности к бесконфликтным маршрутам.

Программа получается из процессорного графа заменой вершин командами фотонного компьютера.

В процессе вычислений каждый идентификатор сопровождается текущим значением  $t = 0, 1, \dots, m$ , где  $m$  – глубина ЯПФ алгоритма [12]. Значение  $t$  увеличивается на единицу при каждом «прохождении» ПЭ.

Процессорные элементы, незадействованные в выполнении команд программы, в каждом интервале принимают и передают символ  $\emptyset$  и значения  $t$  (увеличивая  $t$  на единицу).

Процессорный элемент выполняет операцию лишь тогда, когда по всем его каналам  $\delta$  получена информация с одинаковым, очередным значением  $t$ .

### Пример вычислительного процесса

Построим процессорный граф для вычисления значения выражения  $A = a + (b + c) \times d$  фотонным компьютером, ПЭ которого объединены в  $\Gamma^3$  – трехмерный гиперкуб [9], показанный на рис. 2. Номера обозначений на рис. 1 и на 2 совпадают.

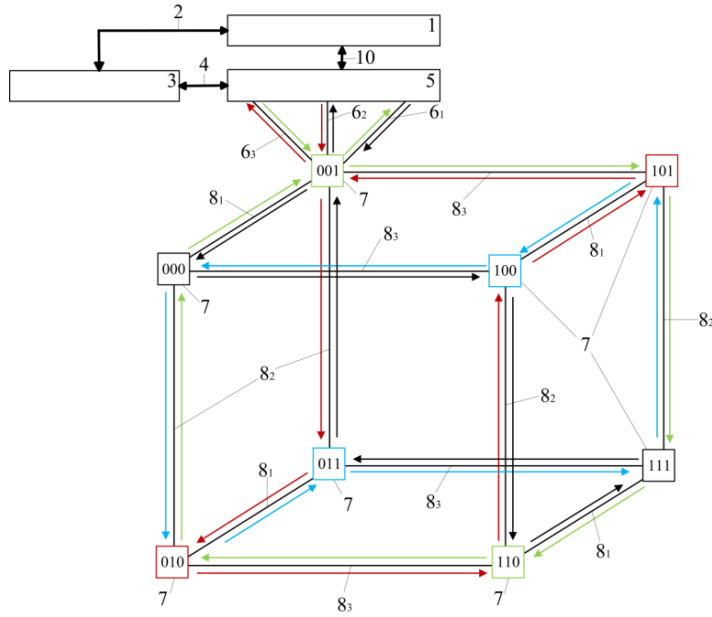


Рис. 2. Структура фотонного компьютера с топологией  $\Gamma^3$

Каждая вершина  $\Gamma^3$  означает процессорный элемент, которому соответствует вектор  $\vec{\sigma} = (\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1)$ , где  $\sigma_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Ребра, соединяющие вершины  $\Gamma^3$ , соответствуют каналам 8, они помечены  $8_1, 8_2, 8_3$ .

Кроме того, ПЭ соединены с устройством 5 каналами  $6_1, 6_2, 6_3$ , внешними для  $\Gamma^3$ . На рис. 2 каналы  $6_1, 6_2, 6_3$  показаны только для ПЭ в вершине  $(0, 0, 1)$ .

Для  $\Gamma^3$  и длины маршрута три имеем [9] четыре бесконфликтных множества  $((000), (111)), ((001), (110)), ((010), (101))$  и  $((100), (011))$ . Их вершины и соединяющие эти вершины бесконфликтные маршруты помечены на рис. 2 цветами – черным, зеленым, красным и синим соответственно. Направления передачи показаны стрелками.

В табл. 1 и 2 для элементов  $(0, 0, 0)$  и  $(0, 0, 1)$  приведены векторы  $\vec{\sigma}$ , соответствующие процессорным элементам, от которых по каналам  $8_1, 8_2, 8_3$  в интервалы  $t = 0, 1, \dots, 6$  по бесконфликтным маршрутам поступает информация.

Таблица 1

Поступление информации в ПЭ (000)

$t$	$8_1$	$8_2$	$8_3$
	001	010	100
0	000	000	000
1	001	010	100
2	011	110	101
3	111	111	111
4	110	101	011
5	100	001	010
6	000	000	000

Поступление информации в ПЭ (001)

t	8 <sub>1</sub>	8 <sub>2</sub>	8 <sub>3</sub>
	000	011	101
0	001	001	001
1	000	011	101
2	010	111	100
3	110	110	110
4	111	100	010
5	101	000	011
6	001	001	001

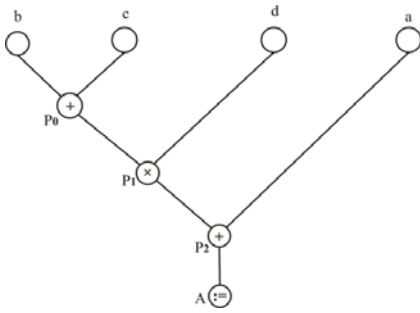


Рис. 3. ЯПФ алгоритма для вычисления значения  $A = a + (b + c) \times d$  в записи  $Aabc + d \times + :=$

ЯПФ алгоритма для выражения  $A = a + (b + c) \times d$  в записи  $Aabc + d \times + :=$  представлена на рис.3, процессорный граф – на рис.4. Он состоит из вершин, соответствующих процессорным элементам ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ ), в интервалы времени t и обозначаемых ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ )<sub>t</sub>. Вершины соединены ребрами из каналов 8, принадлежащими бесконфликтным маршрутам.

Идентификаторы загружаются соответственно в вершины  $(0, 0, 0)_0$  – значение «b»,  $(0, 1, 1)_0$  – значение «c»,  $(1, 0, 1)_0$  – идентификатор операции {+},  $(1, 1, 0)_0$  – идентификатор операции {×},  $(1, 0, 1)_0$  – значение «d». Перечисленные символы поступают из устройства 5 по каналам 6 как показано на рис. 4. В остальные элементы поступают символы ∅.

Показанный, в частности, на рис. 4 маршрут идентификатора A в интервалы  $t = 0, 1, 2, 3, 4$  состоит из вершин  $(0, 0, 0)_0, (1, 0, 0)_1, (1, 1, 0)_2, (0, 1, 0)_3, (0, 0, 0)_4$ . Маршруты символов ∅ показаны частично, пунктирными линиями.

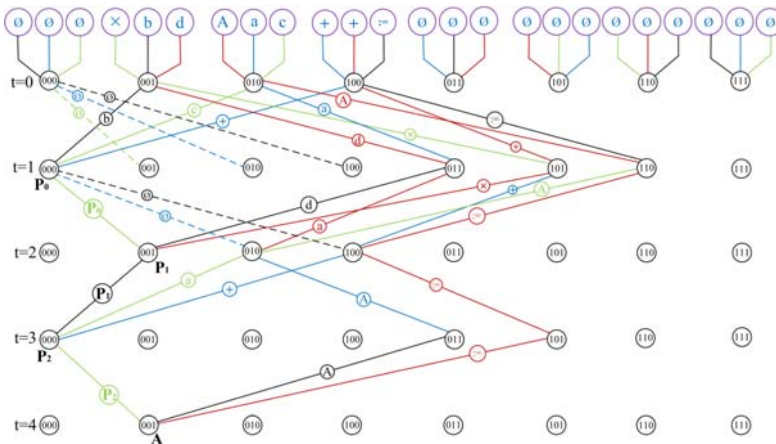


Рис. 4. Процессорный граф для вычисления значения выражения  $A = a + (b + c) \times d$  в записи  $Aabc + d \times + :=$

Заменяя вершины графа командами получаем программу для фотонного компьютера. Программа состоит из команд, предписывающих действия, выполняемые в каждый интервал t каждым ПЭ, по каждому каналу.

Различаем три фазы выполнения команды:

- фаза  $\phi = 1$ ; прием информации из каналов в ПЭ;

- фаза  $\varphi = 2$ ; выполнение ПЭ действий, предписываемых кодом операции;
- фаза  $\varphi = 3$ ; передачи информации из ПЭ приемникам в других ПЭ.

В табл. 3 приведена программа фотонного процессора с топологией  $\Gamma^3$ , полученная из процессорного графа, представленного на рис.4. В каждом столбце ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ ) при  $\varphi = 1$  запись  $x/z$  означает, что в интервал  $t = z$  идентификатор  $x$  принимается по каналу  $\delta_i$  ПЭ ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ );  $\varphi = 2$  указывает на выполнение операции данным ПЭ в течение интервала  $t = z$ , прочерк означает отсутствие операции; при  $\varphi = 3$  запись  $x/z$  означает, что в интервал  $z$  идентификатор  $x$  передается по каналу  $\delta_i$  ПЭ ( $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$ ); цвет черты в записи  $x/z$  совпадает с цветом маршрута, по которому принимается или передается информация.

Таблица 3

Программа фотонного процессора вычисления выражения  $A = a + (b + c) \times d$  в записи  $Aabc + d \times + :=$

t	φ	000			001			010			100			011			101			110			111			
		$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	
0	1	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\{ \times \} b}{0}$	$\frac{d}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{A}{0}$	$\frac{a}{0}$	$\frac{c}{0}$	$\frac{\{ + \} \{ + \} :=}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$	$\frac{\emptyset}{0}$
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{b}{1}$	$\frac{d}{1}$	$\frac{\{ \times \}}{1}$	$\frac{a}{1}$	$\frac{c}{1}$	$\frac{A}{1}$	$\frac{\{ + \} := \{ + \}}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	
1	1	$\frac{b}{1}$	$\frac{c}{1}$	$\frac{+}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{a}{1}$	$\frac{d}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{+}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\times}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{:=}{1}$	$\frac{A}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	$\frac{\emptyset}{1}$	
	2	$\frac{+}{1}$	$\frac{b}{1}$	$\frac{c}{1}$	$P_0$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	$\frac{P_0}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{a}{2}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{+}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\times}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{:=}{2}$	$\frac{A}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	
2	1	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{P_0}{2}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{\times}{2}$	$\frac{a}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{A}{2}$	$\frac{+}{2}$	$\frac{:=}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	$\frac{\emptyset}{2}$	
	2	-	-	-	$\times P_{0d}$	$P_1$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{P_1}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{A}{3}$	$\frac{a}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{:=}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{+}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	
3	1	$\frac{P_1}{3}$	$\frac{a}{3}$	$\frac{+}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{A}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{:=}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	$\frac{\emptyset}{3}$	
	2	$\frac{+}{3}$	$\frac{a}{3}$	$\frac{P_1}{3}$	$P_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	$\frac{P_2}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{A}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{:=}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	
4	1	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{P_2}{4}$	$\frac{A}{4}$	$\frac{:=}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	$\frac{\emptyset}{4}$	
	2	-	-	-	$:= A P_2$	$A$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{A}{5}$	$\frac{-}{5}$	$\frac{-}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	$\frac{\emptyset}{5}$	

Подробности трансляции программ, записанных на языках высокого уровня и особенности получения «машинного» представления этих программ здесь несущественны. Могут быть использованы все известные средства, позволяющие оптимизировать трансляцию и порождаемый в результате ее выполнения машинный код.

## Особенности реализации фотонного процессора

### Топологии связей фотонного процессора

Фотонный процессор представляет собой мультипроцессорную среду, состоящую из ПЭ, соединенных каналами связи.

Можно задействовать любую известную [9] топологию связей – 1D тор, 2D тор, 3D тор,  $H^m$ ,  $\Gamma^n$  – гиперкуб, N – полный матричный коммутатор, S – звезда, F – полносвязное дерево, реализованное из q-портовых коммутаторов. Критериями выбора являются указанные в табл.4 значения величины  $D_k$  – количество маршрутов между двумя ПЭ, находящимися на расстоянии k (измеряемым минимальным количеством ребер между ними), а также указанные в табл.5 значения C и G – мощности и количества бесконфликтных множеств, которые оцениваются относительно диаметра среды – минимального значения k, достаточного для соединения любых двух элементов среды, содержащей  $\omega$  ПЭ. Значения  $D_k$ , C и G получены в [9]. Они определяют коммуникационные возможности среды и, следовательно, параметры процессорных графов и программ.

Таблица 4

Количество маршрутов длины k

Среда	1D	2D	3D	$\Gamma^n$	N	F
$D_k$	2	$2 \cdot 2^{k/2}$	$4k^2 \cdot 2^{k/2}$	k!	1	$(g/2)^{k-1}$

Таблица 5

Мощность и количество бесконфликтных множеств

Среда	1D тор	2D тор	3D тор	$H^m$ $m = 2^{r-1}$ , $r = 0, 1, 2, \dots$	$\Gamma^n$	NS	F
C	2	$2\sqrt{\omega}$	$\frac{2}{\omega^3}$	$\frac{\omega}{2}$	$\frac{\omega}{2}$	$\frac{\omega}{2}$	$\frac{\omega}{2}$
G	$\frac{\omega^2}{2}$	$2\sqrt{\omega} \cdot 2\sqrt{\omega}$	$\frac{2}{\omega^3} \cdot 2\omega^3$	$(\frac{\log \omega}{\log \log \omega}) \frac{\log \omega}{2} \cdot 2^{\frac{\omega}{\log \omega}}$	$\binom{n}{m} \cdot G(H^m)$	$2^{\omega-1}$	$\frac{\omega}{2k^2} 2^k \cdot 2^{\frac{\omega}{2k}}$

Самой «примитивной» является среда 1D тор. Наилучшие значения C и G имеют наиболее сложные в аппаратной реализации среды N и S. Приемлемые на практике значения аппаратной сложности имеют среды с топологией  $\Gamma^n$ . Эти среды характеризуются близкими значениями  $D_k$ , C и G.

Среда  $\Gamma^n$  имеет удобный аппарат построения бесконфликтных маршрутов и формальное описание булевыми функциями, для нее предложены средства топологического резервирования, позволяющие автоматически замещать отказавшие ПЭ с полным сохранением топологии среды и вычислительного процесса [9].

### Взаимодействие с внешней средой

Обмен фотонного процессора с внешней средой должен занимать как можно меньше времени. Это достигается, если каждому ПЭ фотонного процессора предоставить доступ к внешней среде, например, назначить электронный процессор, который реализует функции хранения и обмена информацией.

Электронные процессоры, соответствующие элементам фотонного процессора, можно объединить каналами связи в мультипроцессорную среду, в частности, имеющую ту же топологию, что и фотонный процессор. Это позволяет задействовать одинаковое описание электронной и фотонной компонент фотонного компьютера.

### Элементная база фотонного процессора

Элементная база – функционально полный набор ОЛЭ, позволяющий выполнять любые арифметические и логические операции. Таким набором (неединственным) являются элементы, реализующие три логические функции «И», «ИЛИ», «НЕ» [8].

Эти элементы могут быть реализованы применением различных эффектов, например, интерференционных [5], нелинейных [6], и др. [7]. Они пассивны, не требуют дополнительной энергии накачки. Все операции осуществляются лишь со световой формой представления информации. Длительность выполнения операции определяется длительностью распространения света в ОЛЭ.

### Оценки параметров

Полагаем, что в фотонном компьютере на рис.2 задействован источник лазерного излучения мощностью  $P_{\Sigma} = 100$  Вт и длиной волны  $\lambda \approx 1530$  нм; мощность излучения, поступающего во входные волноводы ПЭ составляет  $P_1 = 1$  мВт, минимальная оптическая мощность на входе ОЛЭ, основанном на эффекте интерференции [5], составляет 100 нВт [10].

Бюджет оптической мощности ПЭ составит  $b \cdot 40$  дБ, где  $b = P_{\Sigma} / 8 \cdot P_1 \approx 10^4$  шт. – количество входных ОЛЭ в каждом ПЭ.

Эффективность ввода излучения в волновод полагаем 90% [13], удельные потери в ОЛЭ и в волноводах принимаем  $\Delta = 0,1 - 1,0$  дБ/см [13]. Суммарная длина волноводов ОЛЭ одного ПЭ не превышает  $L = b \cdot (0,35 - 3,5)$  м.

Полагая длину волновода  $D = 50\lambda = 75 \cdot 10^{-6}$  м, расстояние между входами ОЛЭ  $l = 7,5 \cdot 10^{-6}$  м, находим [11] диаметр входного волновода ОЛЭ из [5]  $h = 7,5 \cdot 10^{-6}$  м.

В одном ПЭ можно разместить  $\rho = L / D = 4,7 \cdot 10^7 - 4,7 \cdot 10^8$  шт. ОЛЭ.

Необходимое количество ОЛЭ в  $n = 64$  разрядном множителе согласно [8] не превышает  $(23n^2 + 5n - 58) \approx 10^5$  шт.

Аппаратно УУ не сложнее АЛУ [8], следовательно,  $\rho = L / D = 4,7 \cdot 10^7 - 4,7 \cdot 10^8$  штук ОЛЭ достаточно для реализации ПЭ, содержащего 230-2300 АЛУ. Известно [8], длительность выполнения операции умножения  $n$ -разрядных чисел составляет  $t^* \approx 41,5 \cdot n \cdot \tau$ , где  $\tau$  – длительность срабатывания элемента, здесь  $\tau = D/v$  – длительность задержки в одном ОЛЭ,  $v = 2 \cdot 10^8$  м – скорость света в волноводе. Для  $n = 64$  производительность АЛУ составит  $\pi = 10^9$  оп/с, производительность ПЭ  $\pi_{\Sigma} = 2,3 \cdot 10^{11} - 2,3 \cdot 10^{12}$  оп/с, производительность всего фотонного компьютера  $\pi_{\Sigma} = 8 \cdot \pi \approx 2 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{13}$  оп/с.

Применяя архитектурные средства для оптимизации структуры АЛУ и ПЭ [8], можно получать результат операции каждый интервал  $\tau$  и достигнуть пиковой производительности фотонного компьютера  $\tilde{\pi}_{\Sigma}$ . Для  $\lambda = 1530$  нм и  $D = 50\lambda$  имеем

$$\tilde{\pi}_{\Sigma} = 13 \cdot 10^{15} \text{ оп/с} - 13 \cdot 10^{16} \text{ оп/с.}$$

Значения  $\pi_{\Sigma}$  и  $\tilde{\pi}_{\Sigma}$  для различных  $\lambda$  при  $P_{\Sigma} = 100$  Вт сведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения производительности фотонного компьютера при  $P_{\Sigma} = 100$  Вт

$\lambda$ , нм	D	$\pi_{\Sigma}$ , оп/с		$\tilde{\pi}_{\Sigma}$ , оп/с	
		$\Delta = 1,0$ дБ/см	$\Delta = 0,1$ дБ/см	$\Delta = 1,0$ дБ/см	$\Delta = 0,1$ дБ/см
1530	$50\lambda$	$5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{13}$	$13,3 \cdot 10^{15}$	$13,3 \cdot 10^{16}$
100	$50\lambda$	$1,1 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$2,8 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{19}$

Для ОЛЭ из [5] уменьшение значения D в  $z$  раз (например, в результате уменьшения  $\lambda$ ) увеличивает производительность процессора в  $z^2$  раз (при неизменном бюджете мощности и равных потерях).



Оценки производительности  $\tilde{\pi}_{\Sigma}$  и энергоэффективности  $\tilde{\pi}_{\Sigma} / P_{\Sigma}$  рассмотренного фотонного компьютера в  $10^3 - 10^4$  раз при  $\lambda = 1530$  нм,  $D=50 \lambda$  и  $\Delta = 0,1 - 1,0$  дБ/см превосходят достигаемые современными ЭВМ [14].

Для размещения ПЭ потребуется кремниевая подложка длиной не более  $D \cdot 4,7 \cdot 10^8 = 352 \cdot 10^2$  м и шириной  $s \approx 100$  мкм (очевидно  $s > h$  и  $s > 2l$ ). Площадь ПЭ составляет  $35 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2$ . При толщине подложки 100 мкм, объем восьми ПЭ составит  $V = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

Это приемлемый размер конструктивного элемента, позволяющий отвести 100 Вт тепла посредством обычного воздушного охлаждения.

## Заключение

Эффективность обработки информации в световой форме достигается совместным применением в фотонном компьютере:

- пассивных оптических логических элементов;
- дисциплины вычислений по готовности операндов;
- бесконфликтных алгоритмов обработки информации процессорными элементами, соединенными в мультипроцессорную среду.

Классы задач, решаемых фотонными и электронными компьютерами, совпадают.

Выполненный анализ и полученные оценки демонстрируют возможность достижения фотонным компьютером, задействующим излучение с длиной волны 1530 нм, пиковой производительности в  $10^3 - 10^4$  раз превышающей достигаемую современными электронными вычислительными устройствами при равных энергетических затратах.

Применение технологий, обеспечивающих задействование в фотонном компьютере ультрафиолетового излучения с длиной волны 100 нм позволяет фотонному компьютеру достигнуть эксафлопсной производительности ( $10^{18}$  оп/с) на 100 Вт потребляемой мощности.

## Литература

1. Binkley S. // Quantum Computing. ASCAC DOE US. April 5, 2016 [Electronic resource]. Mode of Access: <https://science.energy.gov/~media/ascri/ascac/pdf/meetings/201604/2016-0405-ascac-quantum-02.pdf>
2. Тарасов Л. В. // Физика лазера. Изд.2-е, испр. и доп. – М.: Книжный дом «Либроком», 2010.
3. 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>
4. Russel John // Hight-enabled Microprocessor Holds Promise for Faster Computers. February 23, 2016 [Electronic resource]. Mode of Access: <http://www/hpcwire.com/2016/02/23/25120>
5. Пат. 20751061 РФ. Оптический логический элемент / Полуэктов А. О.; опубл. 10.03.1997.
6. Kumar A. Implementation of all-optical NAND logic gate and halfadder using the micro-ring resonator structures // Optical and Quantum Electronics. October 2016.
7. Кузнецова О. В., Сперанский В. С. Решение задач обработки оптических сигналов без оптоэлектронного преобразования // Т-Comm. – 2012. – 8. – С. 35 – 39.
8. Цилькер Б. Я., Орлов С. А. Организация ЭВМ и систем. Спб.: Питер, 2004г.
9. Степаненко С. А. // Мультипроцессорные среды супер ЭВМ. Масштабирование эффективности. – М.: Физматлит, 2016.
10. Вербовецкий А. А. // Основы проектирования оптоэлектронных систем связи. – М.: Радио и связь, 2000.
11. Яворский Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: ООО «Изд-во Ониск»: ООО «Изд-во «Мир и Образование» 2008.
12. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. – М.: Наука, 1986.

13. Никаноров Н. В., Шандаров С. М. Волноводная фотоника ИТМО. Санкт-Петербург, 2008.
14. Morgan T. P. Nvidia Rounds Out Pascal Tesla Accelerator Lineup. June 20, 2016. [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.nextplatform.com/2016/06/20/nvidia-rounds-pascal-tesla-accelerator-lineup>.

## PHOTONIC COMPUTER. STRUCTURE AND ALGORITHMS. EVALUATION OF PARAMETERS

*S. A. Stepanenko*

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

A structure and implementation principles of a photonic computer are proposed. Its operation is based on the effects of interaction between coherent light wave systems generated by a laser source generated by a laser source.

The estimations of the performance, power consumed, and physical parameters were produced. These estimations show potential advantages of the photonic computer as compared to the electric one.

*Key words:* photonic processor, optic gate, data flow control.

УДК 532.5

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

*Д. А. Уткин, А. С. Козелков, В. В. Курулин*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров

Для численного моделирования турбулентных течений в каналах и трубах особое внимание должно быть уделено приграничной области турбулентного потока. Метод пристеночных функций позволяет на основе эмпирических закономерностей получить распределение профилей температуры и скорости в области пограничного слоя на относительно грубых сетках. Большинство тепловых пристеночных функций, представленных в литературе, имеют недостатки, связанные с существенной потерей точности результата на сетках низкого разрешения. В настоящем докладе представлен новый вариант пристеночной функции для аппроксимации теплового потока на стенке для чисел Прандтля в интервале от 0,7 до 2. Функция получена методом калибровки подходящих значений безразмерной температуры  $T^+$  при различных  $y^+$  относительно предельного численного решения, полученного на самой густой расчётной сетке, для задачи турбулентного течения в канале. Точность работы функции протестирована на других канонических турбулентных задачах. Результаты работы предложенной функции сравниваются с аналогичными результатами,