

УДК 535.14

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-394-401

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ КВАНТОВОГО АЛГОРИТМА ПОИСКА

Э.О. Самсонов, Ф.Д. Киселев, С.А. Чивилихин, В.И. Егоров, Д.Н. Кириченко,  
 Ю.А. Адам, Р.А. Кабиев, А.В. Глейм

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: Edi.samsonov@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 06.03.19, принята к печати 29.04.19  
 Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Самсонов Э.О., Киселев Ф.Д., Чивилихин С.А., Егоров В.И., Кириченко Д.Н., Адам Ю.А., Кабиев Р.А., Глейм А.В. Моделирование интегрально-оптической реализации квантового алгоритма поиска // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 394–401. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-394-401

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлена модель интегрально-оптической схемы квантового алгоритма поиска. Исследовано влияние ошибок, вызванных реализацией двухкубитового оператора и несовершенством изготовления оптических светоделителей, на результат работы алгоритма. **Метод.** Для оценки влияния ошибок, вызванных оптической реализацией двухкубитового оператора, произведен аналитический расчет схемы алгоритма. Для учета искажений, вызванных погрешностью коэффициента деления, произведено численное моделирование работы алгоритма. Моделирование было выполнено с использованием библиотеки Qutip на языке программирования Python. **Основные результаты.** При сравнении двух известных реализаций главного компонента схемы алгоритма — оператора **CZ** — показано, что двухфотонная линейно-оптическая реализация оператора **CZ**, которая имеет наиболее высокую эффективность срабатывания, вносит критическую ошибку в работу алгоритма. Другая реализация, основанная на проекционных измерениях, ошибки не вносит, однако имеет меньшую эффективность срабатывания. Проведено численное моделирование оптической схемы алгоритма с учетом несовершенства ее компонентов в рамках унитарной динамики. Показано, что вероятность ошибки в работе алгоритма из-за погрешностей изготовления существующих кремниевых светоделителей не превышает 0,011. Оптическая реализация двухкубитового алгоритма Гровера с учетом погрешности деления имеет высокую вероятность безошибочного срабатывания, однако ограничена низкой эффективностью работы двухкубитового оператора. **Практическая значимость.** Проведенное исследование может быть полезно для физической реализации алгоритма. Создание интегрально-оптической схемы, реализующей алгоритм Гровера, позволит построить квантовый маршрутизатор для поиска оптимального маршрута в квантовых сетях сложной топологии.

### Ключевые слова

квантовые вычисления, алгоритм Гровера, оптический чип, линейные оптические квантовые вычисления

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-394-401

## MODELING OF INTEGRATED OPTICAL QUANTUM SEARCH ALGORITHM

E.O. Samsonov, F.D. Kiselev, S.A. Chivilikhin, V.I. Egorov, D.N. Kirichenko,  
 Yu.A. Adam, R.A. Kabiev, A.V. Gleim

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: Edi.samsonov@gmail.com

### Article info

Received 06.03.19, accepted 29.04.19  
 Article in Russian

**For citation:** Samsonov E.O., Kiselev F.D., Chivilikhin S.A., Egorov V.I., Kirichenko D.N., Adam Yu.A., Kabiev R.A., Gleim A.V. Modeling of integrated optical quantum search algorithm. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 394–401 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-394-401

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents a quantum search algorithm model, suitable for integration into a linear optical chip. Error impact caused by two-qubit operator implementation and directional coupler manufacture imperfection on the algorithm output is studied. **Method.** Analytical calculation of the algorithm scheme was performed to assess error impact caused by two-

qubit operator optical implementation. Numerical simulation of the algorithm was executed for taking into account distortions caused by directional coupler imperfections. The simulation was completed using Qutip library on Python programming language. **Main Results.** Two well-known implementations of the algorithm scheme main component, a two-qubit CZ gate, are compared in order to select the most optimal chip architecture. It was shown that one of two-qubit gate implementations introduces an error critical for the algorithm work. Another implementation based on projection measurements does not introduce an error, but has a lower efficiency. We have performed simulation of the proposed scheme, taking into account the imperfections of its components in the framework of unitary dynamics. We have shown that the algorithm error probability does not exceed 0.011. Two-qubit Grover's algorithm optical implementation with regard to directional coupler imperfections has a low error rate, but it is limited by the low two-qubit operator efficiency. **Practical Relevance.** The study carried out can be useful for the physical implementation of the algorithm. Creation of an integrated optical scheme that implements Grover's algorithm will make it possible to build a quantum router for the optimal route search in quantum networks with complex topology.

#### Keywords

Quantum computing, Grover's algorithm, optical chip, linear optical quantum computing

## Введение

Оптические квантовые вычислительные системы являются перспективной технологией для реализации квантовых алгоритмов. За последнее десятилетие были предложены оптические реализации наиболее известных алгоритмов: квантового поиска (алгоритм Гровера) и квантовой факторизации (алгоритм Шора) [1, 2].

До недавнего времени оптические квантовые схемы создавались методами объемной оптики [3]. Объемные элементы не являются перспективными при разработке крупномасштабных квантовых систем, так как нуждаются в юстировке и обладают большими размерами. Увеличение числа кубит в системе требует, чтобы квантовые вычислительные процессоры были компактны и просты в использовании. Перспективным способом решения проблемы масштабирования оптических квантовых систем является использование интегральных волноводных структур. Недавно была обоснована возможность создания масштабируемого квантового оптического чипа [4, 5]. В работе [6] реализована шестикубитовая универсальная система, интегрированная в оптический чип.

Универсальная квантовая вычислительная система позволяет осуществить любые квантовые алгоритмы, используя унитарные преобразования. Такой подход обычно сильно усложняет схему и приводит к увеличению ошибок. Альтернативой является разработка квантовых схем, направленных на решение конкретной задачи. Например, реализация алгоритма Гровера, интегрированная в оптический чип, может быть использована в системе квантовых коммуникаций для решения задач маршрутизации сигнала. На сегодняшний день такой алгоритм был реализован на объемной оптике [7]. В настоящей работе впервые предложена реализация алгоритма на интегральной оптике.

Как интегральная, так и объемная оптическая реализации имеют общие ограничения. Основную сложность для любой квантовой вычислительной системы представляет реализация двухкубитового оператора. Для алгоритма Гровера требуется как минимум два таких оператора. Трудности оптической реализации двухкубитового оператора связаны со слабым фотон-фотонным взаимодействием [8]. Для решения этой проблемы были разработаны протоколы линейных оптических квантовых вычислений (ЛЮКВ), позволяющие создать набор унитарных операций методами линейной оптики [9, 10]. Книлл, Лафлам и Мильбурн (КЛМ) показали, что двухкубитовый оператор может быть реализован, используя только линейные оптические элементы, вспомогательные фотоны и измерения [11]. В протоколе КЛМ предлагается схема оператора **CNOT**, вероятность правильного срабатывания которой  $P = 1/16$ . Позже была представлена реализация оператора **CNOT** с вероятностью  $1/9$  [12], где используется два фотона и две вспомогательные моды. Обе реализации двухкубитового оператора уже экспериментально реализованы на интегральной оптике [6, 13, 14]. Другими факторами, влияющими на результат работы алгоритма, являются потери, вероятностная генерация фотонов, эффективность детектирования и несовершенство оптической схемы. Последнее включает в себя неточности изготовления светоделителей и фазовращателей, а также темновые отчеты детектора фотонов.

В настоящей работе предложена интегрально-оптическая модель алгоритма Гровера. В схеме алгоритма используются двухкубитовые операции **CZ**, которые эквивалентны операциям **CNOT** с точностью до преобразования Адамара  $\mathbf{CZ} = (\mathbf{I} \otimes \mathbf{H})\mathbf{CNOT}(\mathbf{I} \otimes \mathbf{H})$ . Произведено сравнение двух известных реализаций двухкубитового оператора, выбрана оптимальная архитектура оптической схемы алгоритма. Показано, что двухфотонная реализация оператора, которая имеет наиболее высокую эффективность срабатывания, вносит критическую ошибку в работу алгоритма. Двухкубитовая операция, основанная на КЛМ протоколе, имеет меньшую эффективность, однако не вносит ошибок в работу алгоритма. Произведено численное моделирование оптической схемы алгоритма с учетом несовершенства ее компонентов в рамках унитарной динамики. Получена оценка влияния технологических погрешностей изготовления интегральных схем на работу алгоритма.

### Модифицированная схема квантового алгоритма поиска

Квантовый алгоритм Гровера находит один элемент из  $N$  при обращении к оракулу  $\sqrt{N}$  раз [15], что позволяет добиться квадратичного ускорения решения задачи поиска по сравнению с классическими алгоритмами. Задачу поиска можно представить функцией  $f(x) = 1$ , если  $x$  является решением задачи поиска, в противном случае  $f(x) = 0$ . Квантовый оракул, представленный унитарным оператором  $O$ , изменяет фазу состояний, удовлетворяющих условиям поиска. Подробное описание работы алгоритма можно найти в [8].

Для реализации оптической схемы алгоритма предлагается упрощенная квантовая схема (рис. 1), эквивалентная классической [8]. Предложенная схема состоит из унитарных операций.  $X, Z$  — операторы Паули,  $I$  — единичный оператор,  $CZ$  — контролируемая операция Паули,  $H$  — оператор Адамара. В классической схеме алгоритма оракул использует вспомогательные кубиты и трехкубитовые операции, в то время как в предложенной схеме оракул представлен двухкубитовой операцией  $CZ$  и перестраиваемой операцией  $X/I$ . Блок оператора инверсии, представленный в [8], заменен эквивалентным унитарным преобразованием, с помощью операций  $CZ$  и  $Z$ . Упрощение схемы позволяет сократить число элементов, которые потенциально могут вносить ошибку.

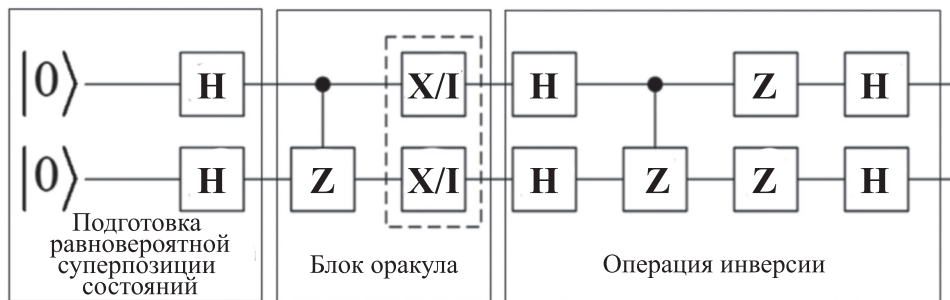


Рис. 1. Схема алгоритма Гровера

На вход алгоритма подается состояние  $|00\rangle$ , в котором оба кубита находятся в состоянии  $|0\rangle$  вычислительного базиса. С помощью операторов Адамара приготавливается равновероятная суперпозиция четырех состояний:  $|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$ . Состояние, удовлетворяющее условию поиска, задается в блоке оракула путем переключения операторов  $X$  и  $I$ . Операции  $XX$  (в пунктирной рамке) соответствует отмеченное оракулом состояние  $|00\rangle$ , подобным образом для  $XI$  —  $|01\rangle$ ,  $IX$  —  $|10\rangle$ ,  $II$  —  $|11\rangle$ . Оставшиеся операторы схемы реализуют операцию инверсии – повышение амплитуды вероятности, отмеченного оракулом состояния. Таким образом, если условию поиска удовлетворяет состояние  $|10\rangle$ , после блока оракула получим:  $|\psi\rangle = (I \otimes X)CZ|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle + |11\rangle)$ . На выходе алгоритма после операции инверсии получаем искомое состояние:  $(H \otimes H)(Z \otimes Z)CZ(H \otimes H)|\psi\rangle = |10\rangle$ .

### Операторы в линейных оптических квантовых вычислениях

Основные элементы линейных оптических квантовых вычислений — фазовращатель и светоделитель [9, 10]. Преобразование, совершаемое фазовращателем, можно записать как:

$$\hat{a}_{out}^\dagger = e^{i\varphi} \hat{a}_{in}^\dagger,$$

где  $\hat{a}_{in/out}^\dagger$  — операторы рождения до и после преобразования,  $\varphi$  — фазовый сдвиг, преобразование светоделителя в операторном виде:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{out}^\dagger &= \sqrt{T} \hat{a}_{in}^\dagger + i\sqrt{R} \hat{b}_{in}^\dagger, \\ \hat{b}_{out}^\dagger &= i\sqrt{R} \hat{a}_{in}^\dagger + \sqrt{T} \hat{b}_{in}^\dagger, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\hat{a}_{in/out}^\dagger, \hat{b}_{in/out}^\dagger$  — операторы рождения до и после преобразования, соответствующие двум различным входам светоделителя,  $R$  и  $T$  — коэффициенты отражения и пропускания.

Однокубитовые операторы, использующиеся для моделирования схемы алгоритма, и их реализация в двухрельсовой кодировке ЛОКВ представлены в таблице.

Рассмотрим реализацию оператора  $CZ$ .

Таблица. Квантовые операторы и их линейные оптические реализации

| Квантовый оператор   | Оптическая реализация   |
|--|---|
| $Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$  | Задержка фазы $\varphi = \pi$                                   |
| $X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$   | Светоделитель, $T = 1$  |
| $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$   | Светоделитель, $T = 0$  |
| $H = 1/\sqrt{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$   | Светоделитель, $T = 0,5$  |
| $U = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\varphi}{2}) & \sin(\frac{\varphi}{2}) \\ \sin(\frac{\varphi}{2}) & \cos(\frac{\varphi}{2}) \end{pmatrix}$ | Интерферометр Маха-Цендера, $\varphi$ — сдвиг фаз от 0 до $\pi$ |
| $CZ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$                                     | Двухкубитовый оператор в соответствии с протоколами ЛОКВ        |

### Реализация двухкубитового оператора CZ для алгоритма Гровера

Используя приведенные в таблице элементы, нами предложена оптическая схема алгоритма Гровера (рис. 2). На входы подается состояние  $|00\rangle$  в вычислительном базисе, что соответствует Фоковскому состоянию  $|1010\rangle$ .  $|n\rangle = (n!)^{-1/2}(\hat{a}^\dagger)^n|0\rangle$  — Фоковское состояние с  $n$  фотонами.  $|0\rangle$  — вакуумное состояние,  $|1\rangle$  — однофотонное состояние в Фоковском базисе.

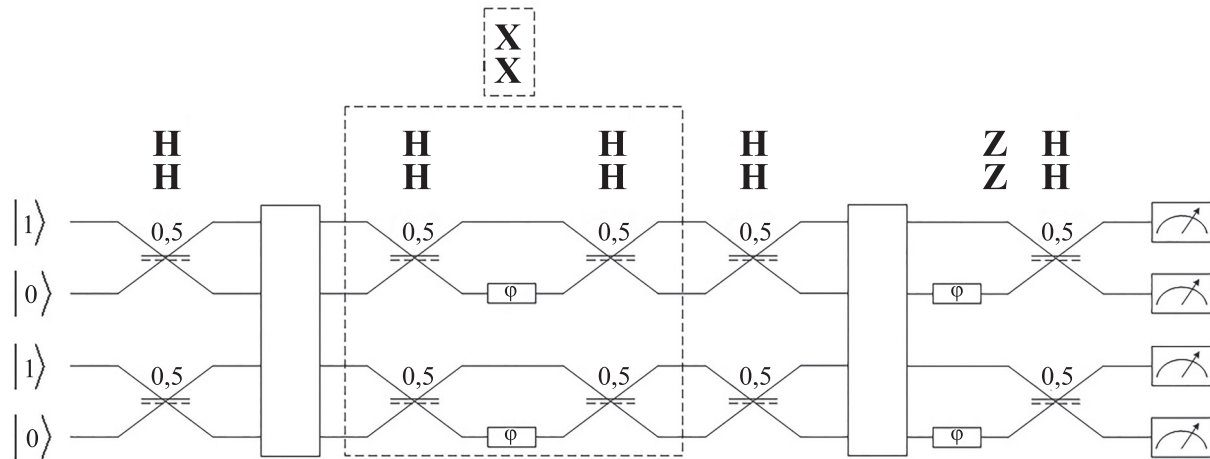


Рис. 2. Оптическая реализация алгоритма Гровера. Числа обозначают коэффициенты деления, пунктирная линия указывает на поворот фазы при отражении

Схема, указанная на рис. 2, содержит в себе два оператора CZ, матрица которого дана в таблице. Можно использовать два существующих протокола ЛОКВ [11, 12]: двухфотонный оператор CZ (вероятность срабатывания  $P = 1/9$ ) и КЛМ CZ (вероятность срабатывания  $P = 1/16$ ). Возможная реализация алгоритма Гровера с использованием двухфотонного оператора CZ представлена на рис. 3.

Докажем, что двухфотонный CZ оператор не подходит для реализации алгоритма, рассчитав выходное состояние схемы. Пусть, условию поиска удовлетворяет состояние  $|1001\rangle$ , входное состояние можно записать как:

$$|\varphi_1\rangle = c_1^\dagger t_1^\dagger |0000\rangle = |1010\rangle, \tag{2}$$

где  $c_1^\dagger$  и  $t_1^\dagger$  — операторы рождения для первой контрольной моды и первой управляемой соответственно. Согласно (1), связь входных и выходных состояний оператора CZ определяется уравнениями (3):

$$\begin{aligned}
 C_{1out} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(C_{1in} + \sqrt{2}v_c) \\
 C_{2out} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-C_{2in} + \sqrt{2}T_{1in}) \\
 T_{1out} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\sqrt{2}C_{2in} + T_{1in}) \\
 T_{2out} &= \frac{1}{\sqrt{3}}(T_{2in} + \sqrt{2}v_t)
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $C_{in/out}$  и  $T_{in/out}$  — амплитуды вероятности до и после преобразования, характеризующие вероятность события, при котором фотон останется в соответствующей контрольной или управляемой моде,  $v_{c/t}$  — амплитуды вероятности, характеризующие события, когда фотон находится в одной из вспомогательных мод.

Последовательно применяя к состоянию (2) операторы алгоритма (рис. 3) можно получить суперпозицию состояний после первого оператора **CZ**:

$$|\varphi_2\rangle = \frac{1}{6}(c_1^\dagger t_1^\dagger + c_1^\dagger t_2^\dagger + c_2^\dagger t_1^\dagger - c_2^\dagger t_2^\dagger + \sqrt{2}c_2^\dagger c_2^\dagger + \sqrt{2}t_1^\dagger t_1^\dagger + \sqrt{2}c_1^\dagger c_2^\dagger + \sqrt{2}t_1^\dagger t_2^\dagger + ext)|0000\rangle.$$

Ожидаемая суперпозиция на выходе оператора:  $\frac{1}{\sqrt{2}}(c_1^\dagger t_1^\dagger + c_1^\dagger t_2^\dagger + c_2^\dagger t_1^\dagger - c_2^\dagger t_2^\dagger)|0000\rangle$ . Как следствие вероятностного характера работы оператора, помимо ожидаемого состояния, наблюдаются побочные, которые проявляются в виде ошибок. Анализируя результат работы алгоритма, можно пренебречь побочными состояниями, отмеченными как *ext*, которые соответствуют исходам, когда фотон попадает во вспомогательную моду. Оставшиеся побочные состояния будут вносить свой вклад в ошибку работы алгоритма. В результате выходное состояние после всей схемы:

$$|\varphi_{out}\rangle = \frac{1}{9}(-2|1010\rangle - 2|1001\rangle + |0110\rangle + 2|0101\rangle + ext).$$

Оракулом было отмечено состояние  $|1001\rangle$ . Для того чтобы была возможность распознать отмеченное состояние, его вероятность должна быть выше вероятности любого другого состояния. Как можно видеть, полученный результат показывает, что квантовый алгоритм Гровера, использующий двухфотонный оператор **CZ**, не имеет возможности определить отмеченное состояние.

Известно, что протокол КЛМ для реализации оператора **CZ** позволяет избежать подобных ошибок [9–11]. Реализация КЛМ основана на проекционных измерениях, т. е. в случае успешного события, когда оператор срабатывает правильно, об этом сигнализируют дополнительные детекторы. Следовательно, точно известно, когда оператор сработал успешно. Однако ограничение на практике — малая вероятность срабатывания ( $P = 1/16$ ) и сложность реализации. Таким образом, оператор КЛМ снижает эффективность алгоритма Гровера, но дает возможность избежать ошибок. Схема алгоритма представлена на рис. 4.

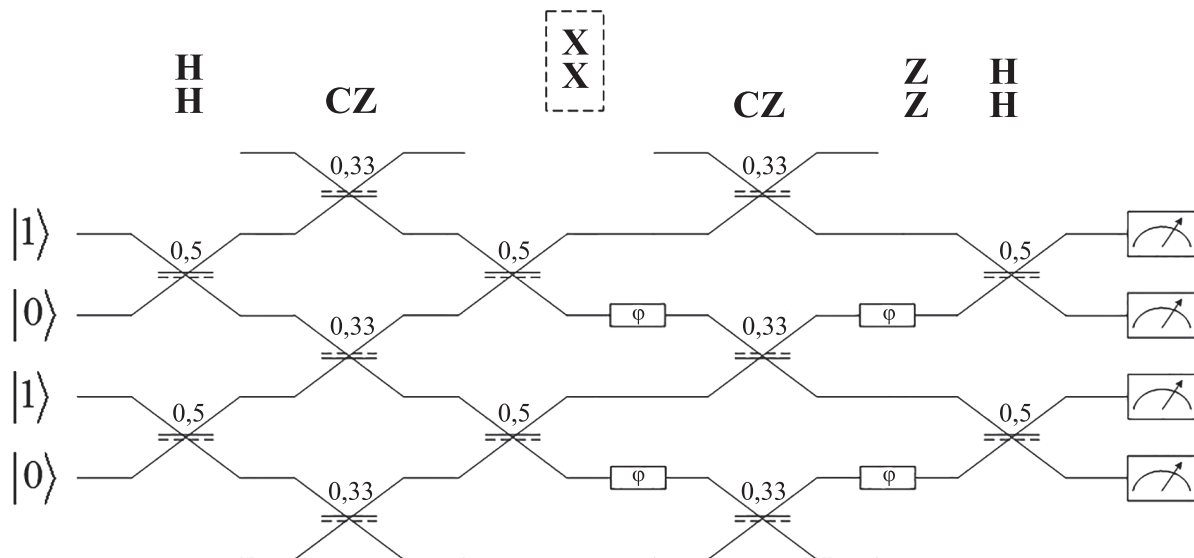


Рис. 3. Реализация алгоритма Гровера в рамках линейных оптических квантовых вычислений с использованием двухфотонных операторов **CZ**



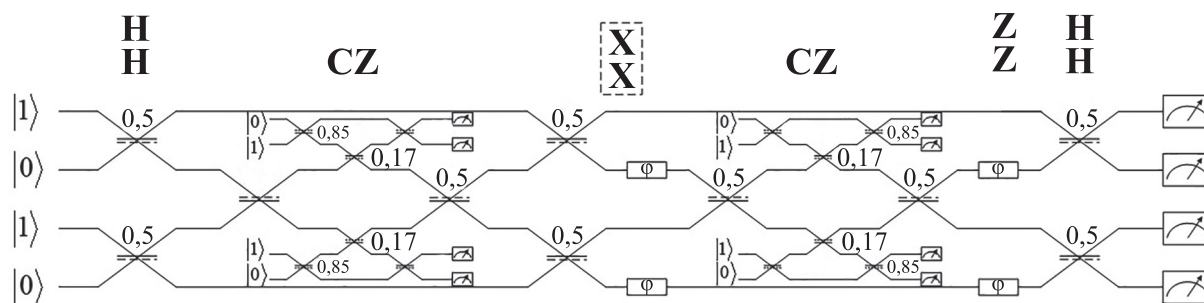


Рис. 4. Реализация алгоритма Гровера в рамках линейных оптических квантовых вычислений с использованием двухкубитовых операторов КЛМ (Книлл, Лафлам, Мильбурн)

### Моделирование алгоритма с учетом несовершенства работы светоделителя

Светоделитель — ключевой элемент ЛОКВ, который вносит значительный вклад в число ошибок [16, 17]. Ошибки, вносимые делителем, обусловлены неточностью коэффициента деления и возникают из-за искажения длины и ширины участка связи. Точность коэффициента деления для интегральных светоделителей составляет  $\pm 0,034$  [16]. Коэффициенты деления (в идеальном случае равны 0,5) для каждого оператора Адамара были случайно выбраны в диапазоне от 0,466 до 0,534. Моделирование было выполнено с использованием библиотеки Qutip [18] на языке программирования Python. Результаты расчетов в виде выходных состояний для каждого отмеченного представлены на рис. 5. На графиках отображены результаты работы алгоритма при различных искомым состояниях:  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$ ,  $|11\rangle$ . В идеальном случае вероятность каждого из четырех исходов должна равняться единице, в действительности видно, что существует некоторая отличная от нуля вероятность распознать состояние, которое не было выбрано оракулом. Из графиков видно, что вероятность ошибки не превысила 0,011. Таким образом, с учетом погрешности деления оптическая реализация двухкубитового алгоритма Гровера имеет высокую вероятность правильного срабатывания.

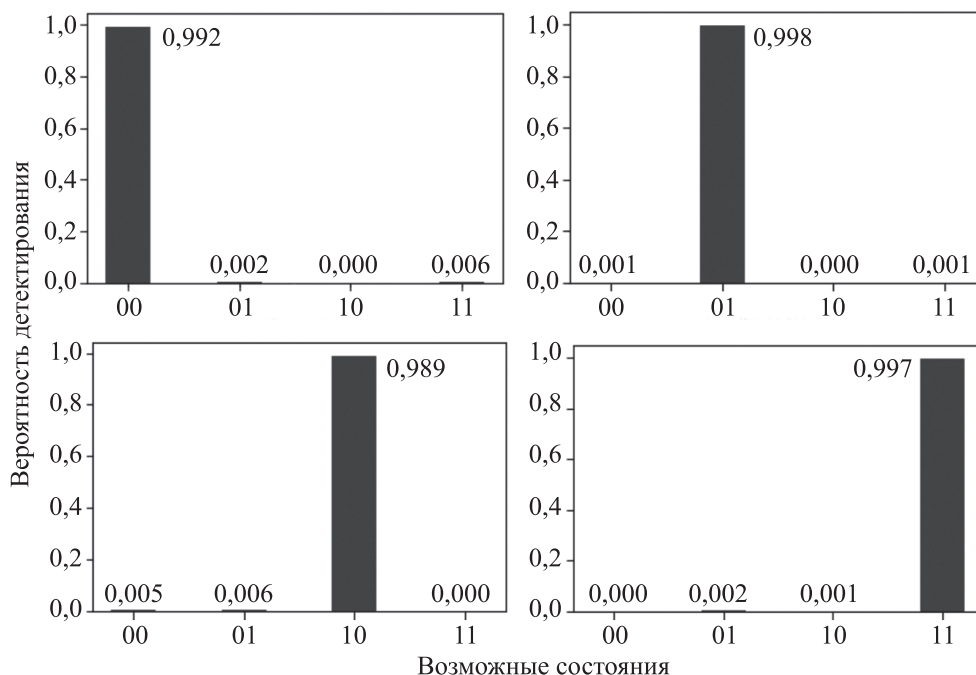


Рис. 5. Вероятности детектирования состояний на выходе алгоритма Гровера, четыре графика соответствуют четырем искомым состояниям  $|00\rangle$ ,  $|01\rangle$ ,  $|10\rangle$ ,  $|11\rangle$

### Заключение

Предложена модель интегрально-оптической схемы квантового алгоритма поиска. Показано, что для реализации алгоритма подходит только одна из двух известных схем двухкубитового оператора CZ, вероятность срабатывания равна 1/16. Двухфотонная линейно-оптическая реализация оператора CZ, которая имеет наиболее высокую вероятность срабатывания (1/9), вносит критическую ошибку в работу алгоритма. Проведено численное моделирование алгоритма, учитывая ошибки, обусловленные искажениями светоделителя в операторах Адамара. Ошибки, вносимые делителем, обусловлены неточностью

коэффициента деления и возникают из-за искажения длины и ширины участка связи. Для параметров существующих кремниевых светоделителей вероятность ошибки оптической реализации алгоритма не превысила 0,011.

Литература

References

- Politi A., Matthews J.C.F., O'Brien J.L. Shor's quantum factoring algorithm on a photonic chip // *Science*. 2009. V. 325. N 5945. P. 1221. doi: 10.1126/science.1173731
- Kwiat P., Mitchell J., Schwendt P., White A. Optical implementation of Grover's algorithm: it's all done with mirrors / In: Kumar P., D'Ariano G.M., Hirota O. *Quantum Communication, Computing, and Measurement 2*. Springer, 2002. 534 p. doi: 10.1007/0-306-47097-741
- Gard B.T., Motes K.R., Olson J.P., Rohde P.P., Dowling J.P. An introduction to boson-sampling. In: *From Atomic to Mesoscale: The Role of Quantum Coherence in Systems of Various Complexities*. World Scientific Publ., 2015. 272 p. doi: 10.1142/9613
- Harris N.C., Bunandar D., Pant M., Steinbrecher G.R., Mower J., Prabhu M., Baehr-Jones T., Hochberg M., Englund D. Large-scale quantum photonic circuits in silicon // *Nanophotonics*. 2016. V. 5. N 3. doi: 10.1515/nanoph-2015-0146
- Gavrilov M.I., Gortinskaya L.V., Pestov A.A. et al. Quantum computer elements based on coupled quantum waveguides // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2007. V. 4. N 2. P. 137–140. doi: 10.1134/S1547477107020082
- Carolan J., Harrold C., Sparrow C., Mart'in-L'opez E., Russell N., Silverstone J., Shadbolt P. J., Matsuda N., Oguma M., Itoh M., Marshall G. D., Thompson M. G., Matthews J. C., Hashimoto T., O'Brien J. L., Laing A. Universal linear optics // *Science*. 2015. V. 349. N 6249. P. 711–716. doi: 10.1126/science.aab3642
- Dodd J.L., Ralph T.S., Milburn G.J. Experimental requirements for Grover's algorithm in optical quantum computation // *Physical Review A*. 2003. V. 68. N 4. doi: 10.1103/PhysRevA.68.042328
- Nielsen M.A., Chuang L.I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J. Linear optical quantum computing with photonic qubits // *Reviews of Modern Physics*. 2007. V. 79. P. 135–174. doi: 9.1103/RevModPhys.79.135
- Мирошниченко Г.П. Линейные оптические квантовые вычисления // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2012. Т. 3. № 4. С. 36–53.
- Knill E., Laflamme R., Milburn G.J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics // *Nature*. 2001. V. 409. N 6816. P. 46–52. doi: 10.1038/35051009
- Ralph T.C., Langford N.K., Bell T.B., White A.G. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis // *Physical Review A*. 2002. V. 65. N 6. doi: 10.1103/PhysRevA.65.062324
- Okamoto R., O'Brien J.L., Hofmann H.F., Takeuchi S. Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities // *PNAS*. 2011. V. 108. N 25. P. 10067–10071. doi: 10.1073/pnas.1018839108
- O'Brien J.L., Pryde G.J., White A.G., Ralph T.C., Branning D. Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate // *Nature*. 2003. V. 426. N 6964. P. 264–267. doi: 10.1038/nature02054
- Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack // *Physical Review Letters*. 1996. V. 79. N 2. P. 325–328. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.325
- Politi A., Matthews J., Thompson M. J., O'Brien J.L. Integrated quantum photonics // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2009. V. 15. N 6. P. 1673–1684. doi: 10.1109/JSTQE.2009.2026060
- Vasilev A., Kozubov A., Gaidash A., Chivilikhin S. On-chip realization of quantum circuits by using waveguides on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 741. doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012104
- Johansson J.R., Nation P.D., Nori F. QuTiP 2: A Python framework for the dynamics of open quantum systems // *Computer Physics Communications*. 2013. V. 184. N 4. P. 1234–1240. doi: 10.1016/j.cpc.2012.11.019
- Politi A., Matthews J.C.F., O'Brien J.L. Shor's quantum factoring algorithm on a photonic chip. *Science*, 2009, vol. 325, no. 5945, pp. 1221. doi: 10.1126/science.1173731
- Kwiat P., Mitchell J., Schwendt P., White A. Optical implementation of Grover's algorithm: it's all done with mirrors. In Kumar P., D'Ariano G.M., Hirota O. *Quantum Communication, Computing, and Measurement 2*. Springer, 2002, 534 p. doi: 10.1007/0-306-47097-741
- Gard B.T., Motes K.R., Olson J.P., Rohde P.P., Dowling J.P. An introduction to boson-sampling. In *From Atomic to Mesoscale: The Role of Quantum Coherence in Systems of Various Complexities*. World Scientific Publ., 2015, 272 p. doi: 10.1142/9613
- Harris N.C., Bunandar D., Pant M., Steinbrecher G.R., Mower J., Prabhu M., Baehr-Jones T., Hochberg M., Englund D. Large-scale quantum photonic circuits in silicon. *Nanophotonics*, 2016, vol. 5, no. 3. doi: 10.1515/nanoph-2015-0146
- Gavrilov M.I., Gortinskaya L.V., Pestov A.A. et al. Quantum computer elements based on coupled quantum waveguides. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 2007, vol. 4, no. 2, pp. 137–140. doi: 10.1134/S1547477107020082
- Carolan J., Harrold C., Sparrow C., Mart'in-L'opez E., Russell N., Silverstone J., Shadbolt P.J., Matsuda N., Oguma M., Itoh M., Marshall G.D., Thompson M.G., Matthews J.C., Hashimoto T., O'Brien J.L., Laing A. Universal linear optics. *Science*, 2015, vol. 349, no. 6249, pp. 711–716. doi: 10.1126/science.aab3642
- Dodd J.L., Ralph T.S., Milburn G.J. Experimental requirements for Grover's algorithm in optical quantum computation. *Physical Review A*, 2003, vol. 68, no. 4. doi: 10.1103/PhysRevA.68.042328
- Nielsen M.A., Chuang L.I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J. Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Reviews of Modern Physics*, 2007, vol. 79, pp. 135–174. doi: 9.1103/RevModPhys.79.135
- Miroshnichenko G.P. Linear optical quantum computing. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 36–53. (in Russian)
- Knill E., Laflamme R., Milburn G.J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. *Nature*, 2001, vol. 409, no. 6816, pp. 46–52. doi: 10.1038/35051009
- Ralph T.C., Langford N.K., Bell T.B., White A.G. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis. *Physical Review A*, 2002, vol. 65, no. 6. doi: 10.1103/PhysRevA.65.062324
- Okamoto R., O'Brien J.L., Hofmann H.F., Takeuchi S. Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities. *PNAS*, 2011, vol. 108, no. 25, pp. 10067–10071. doi: 10.1073/pnas.1018839108
- O'Brien J.L., Pryde G.J., White A.G., Ralph T.C., Branning D. Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate. *Nature*, 2003, vol. 426, no. 6964, pp. 264–267. doi: 10.1038/nature02054
- Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 79, no. 2, pp. 325–328. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.325
- Politi A., Matthews J., Thompson M.J., O'Brien J.L. Integrated quantum photonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, vol. 15, no. 6, pp. 1673–1684. doi: 10.1109/JSTQE.2009.2026060
- Vasilev A., Kozubov A., Gaidash A., Chivilikhin S. On-chip realization of quantum circuits by using waveguides on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 741. doi: 10.1088/1742-6596/741/1/012104
- Johansson J.R., Nation P.D., Nori F. QuTiP 2: A Python framework for the dynamics of open quantum systems. *Computer Physics Communications*, 2013, vol. 184, no. 4, pp. 1234–1240. doi: 10.1016/j.cpc.2012.11.019

### Авторы

**Самсонов Эдуард Олегович** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-4349-6603, [Edi.samsonov@gmail.com](mailto:Edi.samsonov@gmail.com)

**Киселев Федор Дмитриевич** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-3894-511X, [kisteddy@gmail.com](mailto:kisteddy@gmail.com)

**Чивилихин Сергей Анатольевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6505914990, ORCID ID: 0000-0003-4700-0027, [sergey.chivilikhin@gmail.com](mailto:sergey.chivilikhin@gmail.com)

**Егоров Владимир Ильич** — кандидат физико-математических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55429352600, ORCID ID: 0000-0003-0767-0261, [egorovvl@gmail.com](mailto:egorovvl@gmail.com)

**Кириченко Даниил Николаевич** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9567-8169, [Kirichenko.daniil.n@gmail.com](mailto:Kirichenko.daniil.n@gmail.com)

**Адам Юрий Александрович** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-5040-0040, [adam\\_yura@mail.ru](mailto:adam_yura@mail.ru)

**Кабиев Руслан Аубакирович** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2796-4067, [kabievruslan1999@gmail.com](mailto:kabievruslan1999@gmail.com)

**Глейм Артур Викторович** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56316444200, ORCID ID: 0000-0003-2307-5454, [aglejm@yandex.ru](mailto:aglejm@yandex.ru)

### Authors

**Edward O. Samsonov** — engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-4349-6603, [Edi.samsonov@gmail.com](mailto:Edi.samsonov@gmail.com)

**Fedor D. Kiselev** — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-3894-511X, [kisteddy@gmail.com](mailto:kisteddy@gmail.com)

**Sergey A. Chivilikhin** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6505914990, ORCID ID: 0000-0003-4700-0027, [sergey.chivilikhin@gmail.com](mailto:sergey.chivilikhin@gmail.com)

**Vladimir I. Egorov** — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55429352600, ORCID ID: 0000-0003-0767-0261, [egorovvl@gmail.com](mailto:egorovvl@gmail.com)

**Daniil N. Kirichenko** — student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9567-8169, [Kirichenko.daniil.n@gmail.com](mailto:Kirichenko.daniil.n@gmail.com)

**Yury A. Adam** — student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-5040-0040, [adam\\_yura@mail.ru](mailto:adam_yura@mail.ru)

**Ruslan A. Kabiev** — student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2796-4067, [kabievruslan1999@gmail.com](mailto:kabievruslan1999@gmail.com)

**Artur V. Gleim** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56316444200, ORCID ID: 0000-0003-2307-5454, [aglejm@yandex.ru](mailto:aglejm@yandex.ru)