

07.3;09.5

## Волноводные логические вентили для магнитооптических кубитов

© Ш.В. Эгамов, А.М. Хидиров, Х.О. Уринов, Х.А. Жуманов

Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий им. Мухаммада аль-Хорезми, Самарканд, Узбекистан  
E-mail: s\_egamov@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 октября 2019 г.

В окончательной редакции 6 февраля 2020 г.

Принято к публикации 15 июня 2020 г.

Представлены результаты исследования свойств магнитооптических волноводных логических вентилях. Простые логические операции могут быть реализованы с помощью изменения состояний фотона в веществе при воздействии модулирующего магнитного поля. Изменяя амплитуду и ориентацию магнитного поля относительно направления распространения света, выбирая ориентацию поляризатора и анализатора и соответствующую конфигурацию волновода, можно проектировать логические вентили, в том числе и для моделей кубитов, преодолевая барьер времени малой когерентности, характерной для оптических кубитов.

**Ключевые слова:** магнитооптика, оптические волноводы, кубиты, логические вентили.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50035.18058

Оптические кубиты считаются наиболее привлекательными кандидатами на роль логических элементов в квантовой информатике и технологии передачи данных. К сожалению, малое время когерентности ( $10^{-15}$  s) для таких кубитов является серьезным препятствием для практического применения. Ученые вынуждены работать с весьма дорогостоящей и сложной оптикой. При конструировании фотонных логических вентилях для манипулирования кубитами наиболее часто используются массивные оптические устройства с техникой применения поляризационного кодирования [1–4].

Логические вентили являются одними из важнейших элементов для функций обработки оптического сигнала, т.е. адресации, демультиплексирования, регенерации и переключений в высокоскоростных оптических сетях передачи данных. Они также могут быть основой комплексных разветвленных вычислительных цепей, включающих полусумматоры, сумматоры, двоичные декодеры и двоичные счетчики [5–7].

В настоящей работе предлагается новая схема использования явления невязимного фарадеевского вращения для кодирования данных, передаваемых оптическим сигналом. Некоторые изученные экспериментально аспекты свойств магнитооптических логических вентилях обсуждаются с точки зрения прикладного применения. Показано, что булевские логические операции исключаящее ИЛИ (OR) и И (AND) могут осуществляться одновременно, если два сигнала с поляризационным кодированием модулируются в волноводе переменным магнитным полем.

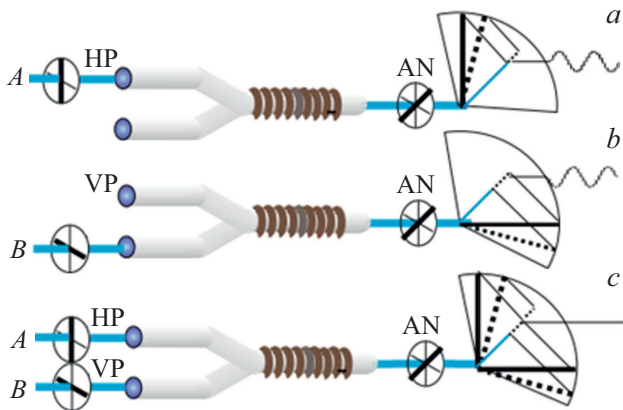
Ранее в работе [8] было показано, что органические материалы обладают вполне приемлемой магнитооптической добротностью в видимой области спектра и соответственно могут быть использованы в качестве элементов магнитооптических устройств.

Концепция „магнитооптических кубитов“, предложенная ранее в работе [9], пока находится в стадии обсуждения. Тем не менее ее использование представляется целесообразным для объяснения поведения лучей поляризованного света, взаимодействующих в предлагаемых геометриях волноводов для магнитооптического полусумматора и сумматора.

Одним из наиболее доступных способов кодирования квантовой информации является использование распространяющихся по двум каналам оптических кубитов, имеющих одну из двух ортогональных мод, которые соответствуют логическому 0 или 1. Этим модам могут, например, соответствовать горизонтальная  $|H\rangle$  и вертикальная  $|V\rangle$  составляющие поляризации фотонов, выступающих в роли кубитов. Подмагничивание переменным магнитным полем позволяет управлять состояниями поляризации и осуществлять контролируемое воздействие на поведение этих состояний кубитов.

Пусть два оптических сигнала  $A$  и  $B$  из двух светодиодов попадают на волновод  $Y$ -образной формы, как это показано на рис. 1. Через поляризационные фильтры, расположенные между источниками света и волноводом, пропускаются взаимно перпендикулярно поляризованные горизонтальные (HP) и вертикальные (VP) компоненты сигналов  $A$  и  $B$  соответственно. В катушке, расположенной в правой части волновода, генерируется переменное магнитное поле, которое приводит к фарадеевскому вращению плоскости поляризации проходящего света. Результирующая интенсивность пучка света, прошедшего через анализатор (AN), регистрируется фотодиодом (на рис. 1 не показан). Полученный фототок может быть далее разделен на постоянную (DC) и переменную (AC) составляющие.

Угол между поляризатором и анализатором составляет  $\pi/4$ . Если рассматривать отдельно ситуацию для сигнала  $A$  (HP) и  $B$  (VP), то получаем, что фототок в



**Рис. 1.** Схема магнитооптического логического вентиля XOR для обработки двух бинарных сигналов в канале суммы *Sum*. *a* —  $A = 1, B = 0, S = 1$ ; *b* —  $A = 0, B = 1, S = 1$ ; *c* —  $A = 1, B = 1, S = 0$ .

обоих случаях (рис. 1, *a* и *b*) при отсутствии магнитного поля в соответствии с законом Малюса будет одинаковым и пропорциональным  $1/2$  начальной интенсивности пучка  $I_0$  (прямые горизонтальные линии на вставках правой стороны рисунка).

Приложение магнитного поля синусоидальной формы вдоль линии распространения света приводит к повороту плоскости поляризации света на угол  $\alpha_F$ . Для малых значений  $\alpha_F$  (рис. 1, *a-c*) фототок зависит от DC- и AC-составляющих:

$$I_{ph} = k(I/2 + I\alpha \sin \Omega t), \quad (1)$$

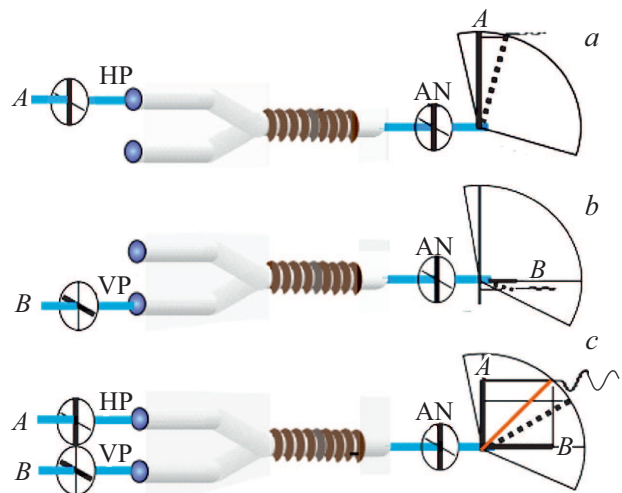
где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $I$  — интенсивность света,  $\alpha$  — фарадеевское вращение (в радианах),  $\Omega$  — частота переменного тока, создающего магнитное поле в катушке волновода. Таким образом, мы получили логический вентиль XOR для двух входящих сигналов. Выходной сигнал в данной геометрии работает как канал суммы классического полусумматора. Отметим, что AC-составляющие интенсивностей выходных сигналов  $A$  и  $B$ , появляющиеся вследствие воздействия переменного магнитного поля, после прохождения анализатора приобретают разность фаз  $\pi$  ( $180^\circ$ ).

Классический полусумматор состоит из двух входов (здесь оптические сигналы  $A$  и  $B$ ) и двух выходов: канала суммы *Sum* и канала переноса *C ont*. Канал переноса может быть реализован так же, как и канал *Sum*. Но для более подробного объяснения необходимо ввести новый параметр, формально называемый „магнитооптическим кубитом“, впервые упомянутым в [9]. В настоящей работе под магнитооптическим кубитом подразумевается некоторый вектор с амплитудой, пропорциональной  $I\alpha$  из уравнения (1). В качестве базисных векторов выступают по необходимости его проекции на оси  $X$ ,  $Y$  и  $XU$  в зависимости от ориентации анализатора в соответствующих каналах выхода.

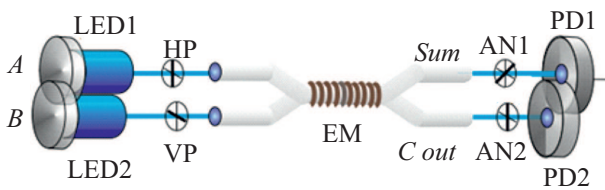
Реализация магнитооптического вентиля AND осуществляется при той же геометрии и с тем же набором элементов, что и для XOR, который мы использовали для канала суммы волноводного полусумматора (рис. 2).

Сигналы  $A$  и  $B$  на рис. 2 имеют те же оси поляризации и такое же расположение, как на рис. 1, но ось анализатора в данном случае ориентирована перпендикулярно оси поляризации сигнала  $A$  и соответственно параллельно  $B$ . В обоих случаях (рис. 2, *a* и *b*), когда имеется один сигнал (только  $A$  или только  $B$ ), выходной переменный сигнал будет равен нулю, как это показано на соответствующих вставках. Это можно более строго доказать с помощью простых тригонометрических преобразований для малых углов фарадеевского вращения. При наличии обоих сигналов мы получаем отклик синусоидальной формы, которому можно присвоить значение  $+1$  (или  $-1$ ).

Для того чтобы все операции проходили одновременно в одном волноводе, достаточно объединить рис. 2 и рис. 1 и перейти от  $Y$ -конфигурации волновода к  $X$ -конфигурации. На базе этой конфигурации волновода была собрана экспериментальная установка, позволяющая на практике изучать основные свойства разрабатываемых магнитооптических логических вентилях, таких, например, как выполняющие операции XOR и AND в полусумматоре (рис. 3). При использовании  $X$ -топологии волновода экспериментально были проверены все возможные комбинации входящих сигналов  $A$  и  $B$  и соответствующих им выходных значений в каналах суммы и переноса ( $\lambda = 440 \text{ nm}$ ,  $H = 100 \text{ Oe}$ , выходное AC-напряжение фотодетектора составляет  $20 \mu\text{V}$ , DC-напряжение равно  $60 \text{ mV}$ ,  $\alpha_F = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ ,  $\Omega = 2\pi \cdot 87 \text{ Hz}$ ). Экспериментально доказано, что перестановочные соотношения полностью согласуются с таблицей истинности для полусумматора.



**Рис. 2.** Схема магнитооптического логического вентиля AND для обработки двух бинарных сигналов в канале переноса *C ont*. *a* —  $A = 1, B = 0, S = 0$ ; *b* —  $A = 0, B = 1, S = 0$ ; *c* —  $A = 1, B = 1, S = 1$ .



**Рис. 3.** Схема магнитооптического полусумматора (периферийная электроника не показана). LED1 и LED2 — светодиоды ( $\lambda = 440 \text{ nm}$ ) для сигналов A и B соответственно; HP и VP — ориентация поляризаторов; EM — электромагнит; Sum — канал суммы волновода; C out — канал переноса; AN1 и AN2 — анализаторы; PD1 и PD2 — фотоприемники для каналов суммы и переноса.

Эксперименты проводились с использованием массивных моделей волноводов и поэтому не могут непосредственно быть использованы для реализации интегральных квантовых микросхем. Тем не менее при наличии соответствующего оборудования появляется возможность перехода от массивной модели магнитооптического волновода к реальному устройству с помощью технологий интегральной оптики и микроэлектроники [7].

Любое логическое устройство с кубитами может быть описано как квантовый регистр, который по определению должен быть более информативным, чем классический. Очевидно, что вместо классического бита, принимающего значения 1 (при наличии входного сигнала A) или 0 (входной сигнал отсутствует), в результате измерения магнитооптического квантового бита теперь мы можем получить значения +1, 0, -1 в зависимости от ориентации анализатора в выходном канале. Используя более сложную геометрию и концепцию генератора магнитооптических кубитов, уже можно сконструировать квантовый полусумматор и квантовое логическое устройство с тремя входами и двумя выходами, называемое квантовым полным сумматором, в которых используется новый вид вентилей — типа контролируемого НЕТ (CNOT) [9].

Интерес к проведению исследований в области приложений оптических кубитов растет в последние годы лавинообразно. Он не ограничивается только квантовыми компьютерами, разработкой алгоритмов и протоколов проведения квантовых вычислений, а распространяется на все новые методы в современной криптографии, причем уже намечился переход от лабораторных экспериментов к реальным испытаниям [10–15].

В настоящей работе представлены основные свойства логических вентилей, созданных с использованием магнитооптических особенностей фотонов, возникающих при модуляции внешнего магнитного поля, приложенного к волноводу из оргстекла, обладающего разумной константой Верде в видимой области. Логические операции XOR и AND происходят одновременно в одном волноводе и могут фиксироваться с помощью простейшей периферийной электроники. Экспериментальное ис-

следование работы волноводного магнитооптического полусумматора проводилось с использованием модуляции магнитного поля низкочастотным генератором для создания логических операций XOR и получения на выходе битов суммы (XOR) и битов переноса (AND) из входных данных.

Такие логические вентили, как NOT, COPY, ERASE или SHIFT REGISTER, также могут быть легко реализованы с помощью концепции магнитооптических кубитов. Более эффективно преимущества предлагаемых магнитооптических квантовых логических устройств могут быть достигнуты при использовании планарной технологии изготовления оптических волноводов, соответствующем масштабировании и миниатюризации всех остальных функциональных элементов устройства.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по координации развития науки и технологий при Кабинете министров Республики Узбекистан в рамках проекта № 17/53 („Магнитооптика“) и частичной поддержке Фонда аль-Хорезми Ташкентского университета информационных технологий.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Rieffel E., Polak W. Quantum computing. A Gentle introduction. MT Press, 2011. 389 p.
- [2] Li P.-L., Huang D.-X., Zhang X.-L., Zhu G.-X. // Opt. Express. 2006. V. 14. N 24. P. 11839–11847.
- [3] Barbosa G.A. // Phys. Rev. A. 2006. V. 73. N 5. P. 052321.
- [4] O'Brien J.L. // Science. 2007. V. 318. N 5856. P. 1567–1570.
- [5] Tsiokos D., Kehayas E., Vyrsokinos K., Houbavlis T., Stampoulidis L., Kanellos G.T., Pleros N., Guekos G., Avramopoulos H. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2004. V. 16. N 1. P. 284–286.
- [6] Bonneau D., Lobino M., Jiang P., Natarajan C.M., Tanner M.G., Hadfield R.H., Dorenbos S.N., Zwiller V., Thompson M.G., O'Brien J.L. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. N 5. P. 053601.
- [7] Crespi A., Mataloni P., Ramponi R., Samsoni L., Sciarrino S., Vallone G., Osellame R. Patent US 20140126030 A1. Publ. May 8, 2014.
- [8] Egamov S. // Frontiers in optics. OSA Technical Digest (CD). Optical Society of America, 2006. Paper FWR6.
- [9] Egamov S. // Frontiers in optics. OSA Technical Digest (online). Optical Society of America, 2013. Paper FTh1C.6
- [10] Fiuřášek J. // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. N 3. P. 033802.
- [11] Thompson M.G., Politi A., Matthews J.C.F., O'Brien J.L. // IET Circuits Dev. Syst. 2011. V. 5. N 2. P. 94–102.
- [12] Kok P., Munro W.J., Nemoto K., Ralph T.C., Dowling J.P., Milburn G.J. // Rev. Mod. Phys. 2007. V. 79. N 1. P. 135–174.

- [13] *Jeong H., Zavatta A., Kang M., Lee S.-W., Costanzo L.S., Grandi S., Ralph T.C., Bellini M.* // Nature Photon. 2014. V. 8. N 7. P. 564–569.
- [14] *Drahi D., Sychev D.V., Pirov K.K., Sazhina E.A., Novikov V.A., Walmsley I.A., Lvovsky A.I.* arXiv: 1905.08562 v1 [Quant-Ph].
- [15] *Pawar H.R., Harkut D.G.* // 2018 Int. Conf. on research in intelligent and computing in engineering (RICE). San Salvador, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/rice.2018.8509035