

## ОБЗОР ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ В КВАНТОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

В.А. Желтиков

zheltikov.vladimir@yandex.ru

Д.В. Пасечникова

da@mt11.su

С. Хыдырова

hydyrova.selbi@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Описаны способы кодирования информации в фотонном квантовом компьютере за счет модуляции характеристик фотонов. Подробно рассмотрены основанные на эффектах электрооптики элементы квантовых оптических интегральных схем, которые позволяют изменять интенсивность, поляризацию и фазу световой волны. Составлена классификация данных элементов по типу модуляции, описаны их устройство, материалы для изготовления и электрооптические эффекты, положенные в основу принципа работы модуляторов. Выявлено, какие из элементов имеют лучшие характеристики и наиболее просто реализуются в КОИС. Найдены проблемы, с которыми возможно столкнуться при практической реализации данных элементов.

### Ключевые слова

Квантовая оптическая интегральная схема, фотонный кубит, модулятор, электрооптический эффект, фазовая пластина, интерферометр Маха — Цендера, направленный ответвитель, поляризатор

Поступила в редакцию 18.05.2022

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022

---

**Введение.** Современные (классические) компьютеры хранят и обрабатывают информацию в виде двоичного кода, что физически реализуется с помощью транзисторов, имеющих только два состояния: «есть ток», т. е. «1», или «нет тока», т. е. «0». Повышение производительности до настоящего времени достигалось за счет миниатюризации транзисторов, которая достигла физического предела в несколько нанометров. Дальнейшее уменьшение транзисторов приведет к проявлению квантовых эффектов, утечке тока и пробоем, что сделает эти элементы неэффективными [1].

Поэтому для развития компьютерных технологий и повышения производительности необходимы принципиально новые идеи, одной из которых является создание квантового компьютера. Такие компьютеры используют кубиты, которые могут находиться не только в состоянии «0» или «1», но также в их суперпозиции; физическая реализация кубитов возможна на основе атомов, ионов, сверхпроводящих джозефсоновских переходов или фотонов [2]. Ионные кван-

товые компьютеры сложно масштабировать из-за аномального нагрева, а также они медленнее своих конкурентов [3]. Недостатком квантовых компьютеров на основе атомов является необходимость высокоточных операций с двумя атомами [4]. Проблема сверхпроводящих кубитов заключается в малом времени жизни в когерентном состоянии [5]. В отличие от альтернатив, фотонные квантовые компьютеры имеют следующие преимущества: передача фотонов может осуществляться на высоких частотах, кубиты не взаимодействуют друг с другом и устойчивы к электромагнитным шумам. Упрощенная квантовая оптическая интегральная схема (КОИС), представленная на рис. 1, является одной из главных составляющих фотонного квантового компьютера и состоит из источников фотонов, волноводов, по которым передается свет, элементов, предназначенных для кодирования фотонов (создания кубитов), и детекторов одиночных фотонов. Закодировать фотон можно, изменив его параметры, такие как фаза, поляризация и интенсивность.

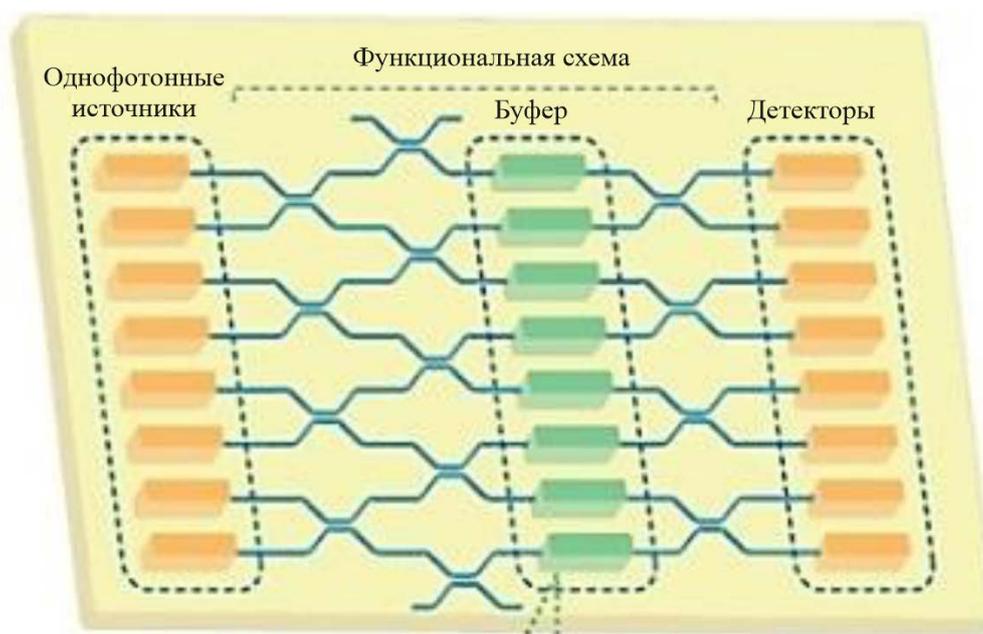


Рис. 1. Упрощенная КОИС [6]

Кодирование информации в обычном компьютере происходит с помощью электрических сигналов; в фотонном квантовом компьютере кубиты можно закодировать с помощью термо-, акусто-, магнито- или электрооптических эффектов. Данные эффекты характеризуют изменение оптических свойств материала (показателя преломления, коэффициента поглощения, поляризации) при изменении его температуры, пропускании через него звуковой волны или приложении магнитного/электрического поля. Конструкции, основанные на

термооптических эффектах, требуют дополнительных элементов для охлаждения, так как при большом количестве близко расположенных компонентов может произойти перегрев, также термооптические элементы относительно медленные (100 мкс) [7]. Недостатками акустооптических модуляторов являются нелинейная зависимость преобразования электрического сигнала в необходимую модуляцию излучения, сдвиг частоты излучения и невысокий контраст [8]. Конструкции, основанные на магнитооптике, имеют следующие недостатки: большой размер элементов [9] и высокие управляющие напряжения [10]. В то же время электрооптические эффекты обладают большими преимуществами: быстродействие (1 нс) и малое управляющее напряжение (3 В) [11]. В данной статье рассмотрено кодирование фотонных кубитов в квантовом компьютере с помощью электрооптических эффектов, позволяющих изменять свойства фотонов на уже готовой КОИС. Элементы КОИС, основанные на эффектах электрооптики и необходимые для изменений параметров фотонов, в данной работе классифицируются по виду модуляции.

**Модуляция фазы.** Модулировать фазу световой волны в КОИС необходимо для достижения когерентности световых пучков. Когерентность требуется на этапе кодирования фотона, так как для некоторых элементов КОИС принципиально важно преобразовывать именно когерентное излучение, в ином случае будет невозможно достичь необходимой модуляции. Например, модулятор на основе интерферометра Маха — Цендера, рассмотренный ниже, может модулировать мощность только при входе в него фазово-когерентного излучения [12]. К тому же проведение операций (логических гейтов) с фотонными кубитами возможно только при их временной и фазовой когерентности.

**Фазовый модулятор на основе эффекта Керра.** Для фазовой модуляции света используют такой электрооптический эффект, как эффект Керра, который используется как в самостоятельных модуляторах [13], так и в составе таких устройств, как, например, модулятор на основе интерферометра Маха — Цендера [14]. Для наблюдения изменения фазы прозрачное диэлектрическое вещество помещают между обкладками плоского конденсатора, к которому прикладывают электрическое поле напряженностью  $E$  (рис. 2). При приложении напряжения модулирующая среда становится в оптическом отношении подобной двулучепреломляющему кристаллу с оптической осью, параллельной направлению электрического поля [12]. Поэтому, пройдя через ячейку Керра, световая волна распадается на две линейно поляризованные составляющие. Одна из них поляризована так, что ее электрический вектор ориентирован перпендикулярно внешнему полю  $E$  (обыкновенная волна), а другая — параллельно  $E$  (необыкновенная волна). Обыкновенная и необыкновенная волны имеют различные показатели преломления ( $n_o$  и  $n_e$ ) и поэтому распространяются в среде с различными скоростями. На выходе из ячейки лучи складываются, при этом изменение интенсивности излучения не происходит.

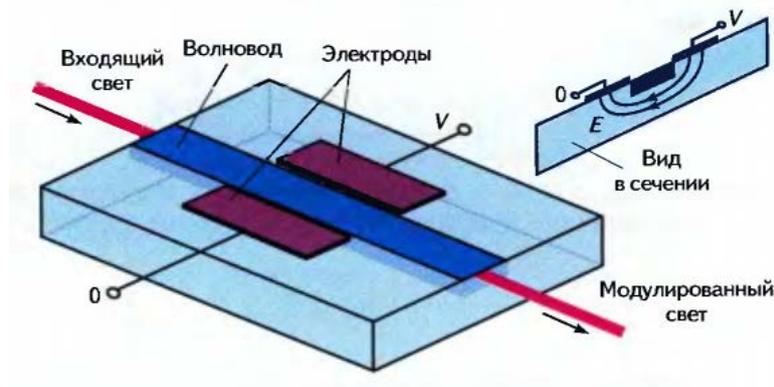


Рис. 2. Поперечный модулятор в КОИС [15]

Разность фаз между обыкновенными и необыкновенными лучами после прохождения пути в модулирующей среде составляет [12]

$$\varphi = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} l = 2\pi \frac{k_k E^2 l}{\lambda} = 2\pi B E^2, \quad (1)$$

где  $k_k$  — коэффициент Керра,  $\text{м}^2/\text{В}^2$ ;  $\lambda$  — длина волны света,  $\text{м}$ ;  $l$  — путь в модулирующей среде,  $\text{м}$ ;  $B$  — постоянная Керра материала волновода,  $\text{м}^2/\text{В}^2$ .

Фазовый модулятор на основе эффекта Керра бывает двух видов: продольный и поперечный (рис. 2). В продольном внешнее поле направлено параллельно распространению света, в поперечном перпендикулярно. В случае продольных модуляторов необходимо использовать прозрачные электроды, которые могут быть выполнены из оксидов цинка, индия или стронция:  $\text{ZnO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$  [19]. Реализация данного модулятора в КОИС представлена на рис. 2.

Эффект Керра наблюдается только в центрально-симметричных кристаллах. В силу квадратичности при изменении направления поля разность фаз не должна менять знак, что невозможно в кристаллах, не имеющих центральной симметрии. Среди материалов с квадратичным электрооптическим эффектом наибольшее распространение получили кристаллы кремния, группы дигидрофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  и кристаллы группы перовскитов (титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  и твердые растворы на его основе) [16].

Однако для создания практически значимого изменения показателя преломления  $\Delta n = 10^{-4}$  в модуляторах на основе эффекта Керра требуется большая напряженность электрического поля ( $10^6$  В/см на длине волны 1,3 мкм). Ввиду того, что даже для слаболегированного кремния это значение напряженности вызывает пробой, модуляция с помощью эффекта Керра практически невозможна. Именно поэтому в настоящее время чаще используют модуляторы на основе эффекта Погкельса [18].

**Фазовый модулятор на основе эффекта Поккельса.** Эффект Поккельса, как и эффект Керра, применяют для модуляции фазы в тех же устройствах, например, в модуляторе на основе Маха — Цендера [17]. Принцип работы модулятора на основе эффекта Поккельса аналогичен принципу работы модулятора на основе эффекта Керра, также имеет два варианта реализации: продольный и поперечный модулятор, а разность фаз  $\varphi$  между обыкновенным и необыкновенным лучами после прохождения пути в модулирующей среде прямо пропорциональна напряженности электрического поля  $E$  [12]:

$$\varphi = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} l = 2\pi \frac{k_p E l}{\lambda} = 2\pi r l E, \quad (2)$$

где  $k_p$  — коэффициент Поккельса, м/В;  $r$  — постоянная Поккельса, м/В.

Эффект Поккельса возникает в изотропных веществах и в кристаллах, обладающих естественной оптической анизотропией. Он может наблюдаться только в кристаллах, не обладающих центром симметрии: в силу линейности при изменении направления поля разность фаз должна менять знак, что невозможно в центрально-симметричных телах. Данный эффект хорошо заметен в кристаллах ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  или арсенида галлия  $\text{GaAs}$  [18].

**Модуляция интенсивности света.** Модуляция интенсивности необходима, поскольку кодирование и передача информации могут происходить не только за счет изменения свойств света, например поляризации, но также за счет интенсивности (среднее количество фотонов через единичную площадку может нести информацию). Также в настоящее время существуют ограничения по детектированию большого количества фотонов одновременно, а количество частиц напрямую зависит от интенсивности. Таким образом, для правильной работы фотонных детекторов часто необходимо уменьшать количество фотонов.

**Модулятор интенсивности на основе интерферометра Маха — Цендера.** Фазовый модулятор, помещенный в одно из плеч интерферометра, может действовать как модулятор интенсивности. Рассмотрим модулятор на основе интерферометра Маха — Цендера, представленный на рис. 3.

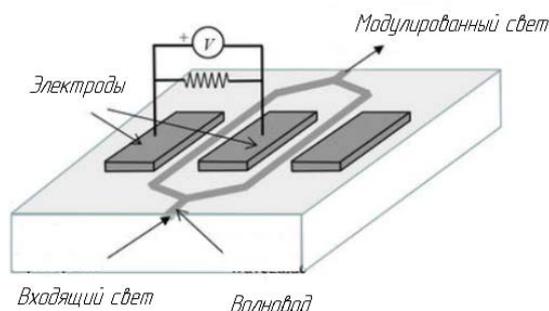


Рис. 3. Интерферометр Маха — Цендера в КОИС (адаптирован из [20])

Принцип работы модулятора состоит в следующем: свет, проходящий по волноводу, разделяется на два пучка Y-разветвителем. Каждый из разделенных пучков проходит между электродами на поверхности кристалла. Электрический сигнал вызывает изменение показателя преломления светового канала. Напряжения приложены так, чтобы ускорить движение излучения в одном плече и замедлить в другом. Это позволяет уменьшить в 2 раза значения управляющих напряжений. Затем волны складываются Y-соединителем. Элемент изготавливается из материалов с сильным электрооптическим эффектом, таких как  $\text{LiNbO}_3$ , GaAs, InP. В настоящее время используется в таких устройствах, как компактные фазовращатели, в фотонных нейронных сетях и приложения с фазированными решетками для LiDAR [21].

**Модулятор интенсивности на основе ячейки Погкельса/Керра с двумя поляризаторами.** Поляризатор — устройство, предназначенное для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения из излучения с произвольным состоянием поляризации, за счет пропускания света, ориентированного только в одном направлении [22]. Устройство изготавливается из различных полимеров, в большинстве случаев на основе графена [23], так как он поглощает свет от видимого до инфракрасного диапазона длин волн, несмотря на то что его толщина составляет всего один атомный слой. Поляризатор в КО-ИС представляет собой волновод с прямоугольным поперечным сечением и графеновой полосой, помещенной в центр волновода [24].

Для того чтобы менять форму поляризации на любую из необходимых на уже готовой схеме, применяют ячейку Погкельса/Керра с двумя поляризаторами (рис. 4).

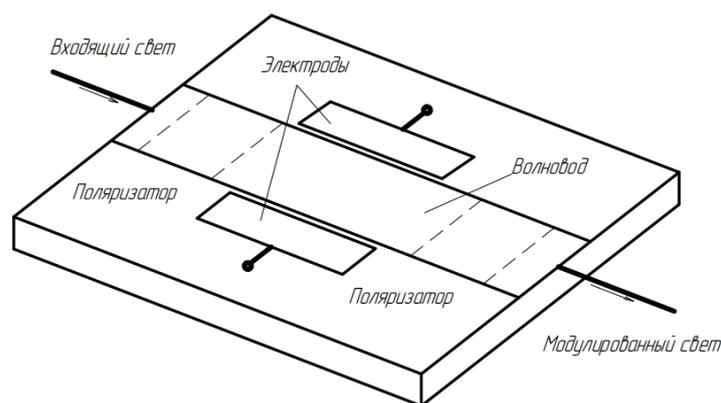


Рис. 4. Ячейка Керра с двумя поляризаторами (адаптирован из [23])

Входной поляризатор служит для преобразования света в поляризованный (если свет плоскополяризован, то входной поляризатор не нужен). Затем поляризованный свет проходит через ячейку Погкельса/Керра, где происходит по-

ворот поляризации. Далее поляризатор на выходе регулирует интенсивность света в соответствии с изменениями состояния поляризации [23]. Данный модулятор активно применяют в дефлекторах лазерного луча, которые, в свою очередь, важны в широком спектре научных и промышленных приложений, таких как флуоресцентная микроскопия, лазерная обработка материалов, оптические накопители, зондирование и лазерные принтеры [25].

**Модулятор интенсивности на основе направленного ответвителя.** Направленные ответвители — это связанные волноводы, из электрооптических материалов с приложенным к ним напряжением через электроды, расположенные на участке связи. В направленных ответвителях, в отличие от связанных волноводов, есть возможность модулировать мощность, изменяя не конструкцию элемента, а прикладываемое к нему напряжение [26].

При распространении света вдоль волноводов происходит периодический обмен энергии между ними. Коэффициент передачи энергии

$$\Gamma = \frac{\pi^2}{4} \sin C^2 \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{\Delta\beta L_0}{\pi} \right)^2} \right], \quad (4)$$

где  $C$  — коэффициент связи;  $\Delta\beta$  — разность постоянных распространения, Гц;  $L_0$  — длина участка сближения волноводов, м.

Коэффициент передачи энергии  $\Gamma$  зависит от двух параметров: коэффициента связи  $C$  и разности постоянных распространения  $\Delta\beta$ . Коэффициент связи  $C$  зависит от расстояния между волноводами в месте сближения, их толщины, от длины участка связи и материала волновода и определяется на этапе проектирования схемы.

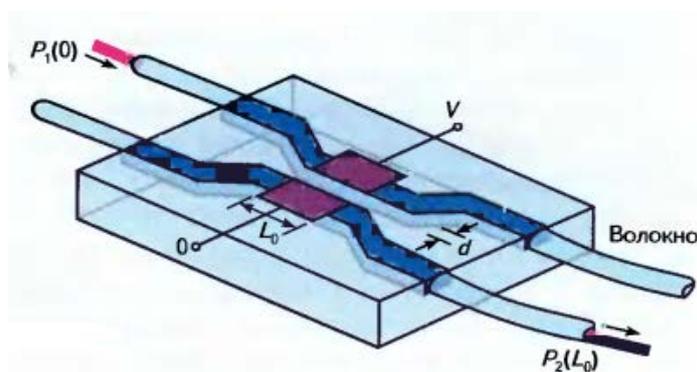


Рис. 5. Направленный ответвитель в КОИС [15]

Разность постоянных распространения на единицу длины зависит от показателей преломления, что позволяет модулировать мощность, изменяя прикладываемое напряжение:

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}, \quad (5)$$

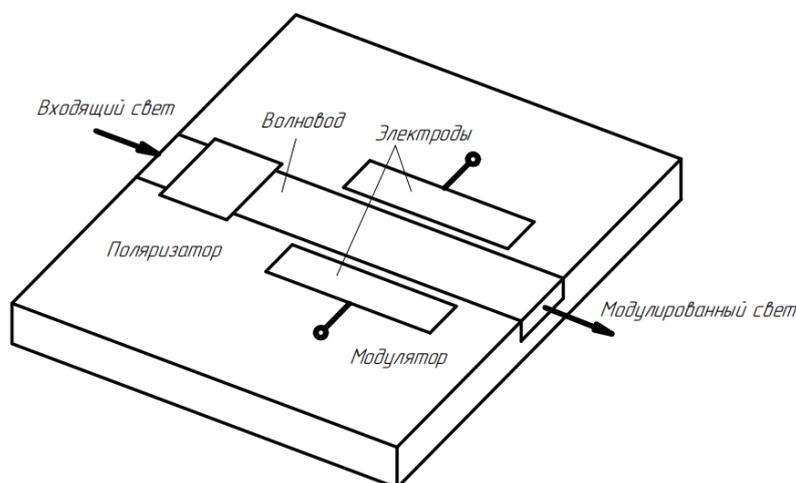
Реализация направленного ответвителя в КОИС представлена на рис. 5.

В настоящее время наиболее часто направленные ответвители применяют в качестве кремниевых фотонных переключателей для реализации логических гейтов [27].

**Модуляция поляризации.** Модуляция поляризации необходима для кодирования фотонов (создания кубитов). Также благодаря изменению поляризации появляется возможность увеличивать объем переносимой информации: два состояния поляризации, таких как горизонтальная и вертикальная или круговая (по левому и правому кругу) объединяются в один поток и передаются одновременно.

**Ячейка Поккельса/Керра с одним поляризатором.** По отдельности поляризатор представляет интерес лишь для геометрической оптики. В совокупности же поляризатор и ячейка Поккельса/Керра полезны для интеграции в КОИС, поскольку при приложении напряжения наблюдаются электрооптические эффекты.

Устройство данного элемента полностью аналогично модулятору интенсивности с двумя поляризаторами, с тем лишь отличием, что здесь отсутствует второй поляризатор на выходе (рис. 6).



**Рис. 6.** Ячейка Керра с одним поляризатором (адаптирован из [23])

Поляризатор на входе делит световую волну на две компоненты, одну из которых пропускает, а вторую поглощает. Далее поляризованный свет проходит через фазовую пластинку с электродами, где за счет приложенного напряжения происходит поворот поляризации [23].

**Результаты.** Изучены и описаны элементы на основе электрооптики, используемые для создания фотонных кубитов путем модуляции фазы, поляризации, мощности. Результаты исследования представлены в таблице.

Сравнение элементов КОИС

Элемент КОИС	Модуляция	ЭО эффект	Материалы	Преимущества	Недостатки
Поперечный модулятор	Фазы	Керра	Кристаллы группы $\text{KN}_2\text{PO}_4$ и кристаллы группы перовскитов (титанат бария $\text{BaTiO}_3$ и твердые растворы на его основе) [15]	Относительно простая для изготовления конструкция [12]	Ограниченный диапазон частот (до 100 МГц) и напряжений (до нескольких кВ) [12]
Продольный модулятор		Поккельса	$\text{LiNbO}_3$ , $\text{ZnO}$ для электродов [18]	Быстрое время отклика, глубина модуляции до 99% [12]	Сложная из-за прозрачных электродов конструкция для изготовления
Модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера	Интенсивности	Поккельса или Керра	$\text{LiNbO}_3$ или $\text{GaAs}$ ; $\text{ZnO}$ для электродов [20]	Скорость передачи данных 10 Гб/с [18]	Величина оптических потерь больше, чем у направленных ответвителей (3 и 1 дБ соотв.)
Ячейка Поккельса/Керра с двумя поляризаторами		Поккельса или Керра	$\text{LiNbO}_3$ или $\text{GaAs}$ ; $\text{ZnO}$ для электродов, полимер на основе графена для поляризатора [23]	Возможность изменять и фазу, и интенсивность, используя одну конструкцию	Сложная реализация в КОИС из-за графенового поляризатора в центре волновода
Направленный ответвитель		Поккельса или Керра	$\text{LiNbO}_3$ или $\text{GaAs}$ ; $\text{ZnO}$ для электродов [27]	Небольшая величина оптических потерь 1дБ	Большие габаритные размеры [29] в среднем 30 мкм [30], в то время как модулятор Маха-Цендера 13 мкм [28]
Фазовая пластина с одним поляризатором	Поляризации	Поккельса или Керра	$\text{LiNbO}_3$ или $\text{GaAs}$ ; $\text{ZnO}$ для электродов, полимер на основе графена для поляризатора [23]	Возможность на одной конструкции изменять поляризацию, фазу и интенсивность	Относительно сложная реализация в КОИС

Можно сделать вывод, что для модуляции фазы одинаково подходят поперечный и продольный модуляторы. Выбор в пользу того или иного устройства необходимо делать, исходя из удобства использования материала элемента. В случае необходимости изменять форму поляризации на уже готовой конструкции с помощью приложения напряжения используется фазовая пластина с одним поляризатором. Для кодирования фотона изменением интенсивности, руководствуясь конструкционными особенностями, выбирают между модулятором на основе интерферометра Маха — Цендера, направленным ответвителем и электроабсорбционным модулятором, как среди элементов с наибольшим количеством преимуществ. При использовании платформы на основе одного материала рекомендуется использовать  $\text{LiNbO}_3$ , поскольку он имеет меньшее поглощение и больший коэффициент Поккельса, чем у  $\text{GaAs}$ . Также из ниобата лития можно изготовить практически все модуляторы на одной схеме.

**Заключение.** Все описанные выше элементы основаны на электрооптических эффектах, что позволяет изменять свойства фотонов или создавать кубиты уже на готовой схеме. В дальнейшем планируется подробнее рассмотреть элементы для изменения фазы, интенсивности и поляризации с наибольшим количеством преимуществ, подробнее изучить материалы и способы их получения, выявить проблемы, с которыми можно столкнуться при практической реализации устройств.

## Литература

- [1] Юнусов Р. Что надо знать о квантовых вычислениях. *trends.rbc.ru: веб-сайт*. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/605aff4d9a79473f1b5733b1> (дата обращения: 15.05.2022).
- [2] Understanding quantum computing. *microsoft.com: веб-сайт*. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/overview-understanding-quantum-computing> (дата обращения: 15.05.2022).
- [3] Что такое закон Мура простыми словами. *future2day.ru: веб-сайт*. URL: <https://future2day.ru/zakon-mura/> (дата обращения: 15.05.2022).
- [4] Бетеров И.И. Квантовые компьютеры на основе холодных атомов. *Автометрия*, 2020, № 4, с. 3–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20200401>
- [5] Беседин И.С., Федоров Г.П., Рязанов В.В. Разработка сверхпроводящих кубитов в России. *Квантовая электроника*, 2018, № 10, с. 880–885.
- [6] Takesue H., Matsuda N., Kuramochi E. et al. An on-chip coupled resonator optical waveguide single-photon buffer. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, art. 2725. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms3725>
- [7] Сидоров Д.И. Термооптические коэффициенты пленок, полученных из плазмы кислорода и гексаметилдисилазана. *Вестник Пермского университета. Сер. Физика*, 2015, № 3, с. 69–73.
- [8] Палашов О.В., Старобор А.В. Ячейка Поккельса для мощного лазерного излучения. Патент РФ 2621365. Заявл. 22.0.2016, опубл. 02.06.2017.

- [9] Басиладзе Г.Д. Магнитооптический модулятор интенсивности света. Патент РФ 161388. Заявл. 11.01.2016, опубл. 20.04.2016.
- [10] Табарин В.А., Потоцкий А.Ю., Иванова Н.А. Двухтактный фарадеевский модулятор лазерного излучения. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*, 2015, № 2, с. 69–74.
- [11] Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб., Лань, 2018.
- [12] Нойкин Ю.М. Физические основы оптической связи. Ростов-на-Дону, ЮФУ, 2011.
- [13] Simili V., Cada M., Pistora J. Silicon slot waveguide electro-optic Kerr effect modulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2018, vol. 30, no. 9, pp. 873–876.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2823080>
- [14] Bottenfield C.G., Thomas V.A., Ralph S.E. Silicon photonic modulator linearity and optimization for microwave photonic links. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2019, vol. 25, no. 5, art. 3400110. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2908784>
- [15] Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника. Принципы и применения. Долгопрудный, Интеллект, 2012.
- [16] Электрооптические материалы. *extxe.com: веб-сайт*. URL: <https://extxe.com/14320/jelektroopticheskie-materialy/> (дата обращения: 20.05.2022).
- [17] Eltes F., Mai C., Caimi D. A BaTiO<sub>3</sub>-based electro-optic Pockels modulator monolithically integrated on an advanced silicon photonics platform. *J. Light. Technol.*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 1456–1462. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2893500>
- [18] Петров В.М., Шамрай А.В. СВЧ Интегрально-оптические модуляторы. Теория и практика. СПб., ИТМО, 2021.
- [19] Патрушева Т. Н. Технологии изготовления компонентов оксидных солнечных батарей. Красноярск, СФУ, 2015.
- [20] Amin R. et. al. 0.52 V mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics. *APL Photonics*, 2018, vol. 3, no. 12, art. 126104. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5052635>
- [21] Dingel B., Madamopoulos N., Prescod A. Adaptive high linearity intensity modulator for advanced microwave photonic links. In: *Optical communication technology*. IntechOpen, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69262>
- [22] Векшин М.М. Исследование и моделирование поляризационных волноводных элементов микро- и нанофотоники. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Краснодар, КГУ, 2019.
- [23] Xu P., Zheng J., Doylend J.K. et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches. *ACS Photonics*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 553–557.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01628>
- [24] Kim J.T., Choi C.G. Graphene-based polymer waveguide polarizer. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3556–3562. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.003556>
- [25] Zhang S., Li Z., Xing F. Review of polarization optical devices based on graphene materials. *Int. J. Mol. Sci.*, 2020, vol. 21, no. 5, art. 1608.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21051608>
- [26] Eichler H., Eichler J., Lux O. Lasers. Basics, advances and applications. Springer, 2018.
- [27] Макаров М.Э., Барабаненков М.Ю., Итальянцев А.Г. Модулятор интенсивности на основе полоскового Si волновода КНИ структуры, нагруженного брэгговским зеркалом. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*, 2018, т. 1, с. 534–538.

- [28] Agrawal G.P. Applications of nonlinear fiber optics. Academic Press, 2020.
- [29] Попков А.Ю. Влияние электрофизических и геометрических параметров на частотные характеристики полосковых направленных ответвителей со слабой связью. Дисс. ... канд. техн. наук. Томск, ТУСУР РАН, 2016.

**Желтиков Владимир Александрович** — студент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Пасечникова Дарья Витальевна** — студентка кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Хыдырова Селби** — аспирантка кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Моисеев Константин Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Желтиков В.А., Пасечникова Д.В., Хыдырова С. Обзор электрооптических модуляторов в квантовых оптических интегральных схемах. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 05(70). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-798>

## OVERVIEW OF ELECTRO-OPTICAL MODULATORS IN QUANTUM OPTICAL INTEGRATED CIRCUITS

V.A. Zheltikov

zheltikov.vladimir@yandex.ru

D.V. Pasechnikova

da@mt11.su

S. Hydyrova

hydyrova.selbi@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

Methods of information coding in a photonic quantum computer by modulation of photon characteristics are described. The elements of quantum optical integrated circuits (QOIC) based on electro-optic effects, which allow changing intensity, polarization and phase of a light wave, are considered in detail. Classification of these elements according to the modulation type, their design, fabrication materials and electro-optical effects underlying the operation principle of modulators are described. The elements with the best characteristics and the simplest implementation in the QOIC are defined. Difficulties that might be encountered in the practical implementation of these elements are identified.

### Keywords

Quantum optical integrated circuit, photonic qubit, modulator, electro-optical effect, phase plate, Mach-Zehnder interferometer, directional coupler, polarizer

Received 18.05.2022

© Bauman Moscow State Technical University, 2022

---

### References

- [1] Yunusov R. Chto nado znat' o kvantovykh vychisleniyakh [What do you need to know about quantum computing]. *trends.rbc.ru: website* (in Russ.). URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/605aff4d9a79473f1b5733b1> (accessed: 15.05.2022).
- [2] Understanding quantum computing. *microsoft.com: website* (in Russ.). URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/overview-understanding-quantum-computing> (accessed: 15.05.2022).
- [3] Chto takoe zakon Mura prostymi slovami [What is Moore law in broad terms]. *future2day.ru: website* (in Russ.). URL: <https://future2day.ru/zakon-mura/> (accessed: 15.05.2022).
- [4] Beterov I.I. Quantum computers based on cold atoms. *Avtometriya*, 2020, no. 4, pp. 3–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20200401> (in Russ.). (Eng. version: *Optoelectron. Instrument. Proc.*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 317–324. DOI: <https://doi.org/10.3103/S8756699020040020>)
- [5] Besedin I.S., Fedorov G.P., Ryazanov V.V. Superconducting qubits in Russia. *Kvantovaya elektronika*, 2018, no. 10, pp. 880–885 (in Russ.). (Eng. version: *Quantum Electron.*, 2018, vol. 48, no. 10, pp. 880–885. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16795>)
- [6] Takesue H., Matsuda N., Kuramochi E. et al. An on-chip coupled resonator optical waveguide single-photon buffer. *Nat. Commun.*, 2013, vol. 4, art. 2725. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms3725>

- [7] Sidorov D.I. Thermo-optic coefficients of films obtained by PECVD from oxygen and hexamethyldisilazane. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Fizika* [Bulletin of Perm University. Physics], 2015, no. 3, pp. 69–73 (in Russ.).
- [8] Palashov O.V., Starobor A.V. Yacheyka Pokkel'sa dlya moshchnogo lazernogo izlucheniya [Pockels cell for powerful laser radiation]. Patent RU 2621365. Appl. 22.0.2016, publ. 02.06.2017 (in Russ.).
- [9] Basiladze G.D. Magnitoopticheskiy modulyator intensivnosti sveta [Magneto-optical light intensity modulator]. Patent RU 161388. Appl. 11.01.2016, publ. 20.04.2016 (in Russ.).
- [10] Tabarin V.A., Pototskiy A.Yu., Ivanova N.A. Push-pull laser modulator on Faraday effect. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovaniye. Neft', gaz, energetika* [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy], 2015, no. 2, pp. 69–74 (in Russ.).
- [11] Sklyarov O. K. Volokonno-opticheskie seti i sistemy svyazi. Sankt-Petersburg, Lan' Publ., 2018.
- [12] Noykin Yu.M. Fizicheskie osnovy opticheskoy svyazi [Physical basis of optical communication]. Rostov-na-Donu, YuFU Publ., 2011 (in Russ.).
- [13] Simili V., Cada M., Pistora J. Silicon slot waveguide electro-optic Kerr effect modulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2018, vol. 30, no. 9, pp. 873–876. DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2823080>
- [14] Bottenfield C.G., Thomas V.A., Ralph S.E. Silicon photonic modulator linearity and optimization for microwave photonic links. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2019, vol. 25, no. 5, art. 3400110. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2908784>
- [15] Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of photonics. John Wiley & Sons, 2019. (Russ. ed.: Optika i fotonika. Printsipy i primeneniya. Dolgoprudnyy, Intellekt Publ., 2012.)
- [16] Elektroopticheskie materialy [Electrooptical materials]. *extxe.com: website* (in Russ.). URL: <https://extxe.com/14320/jelektroopticheskie-materialy/> (accessed: 20.05.2022).
- [17] Eltes F., Mai C., Caimi D. A BaTiO<sub>3</sub>-based electro-optic Pockels modulator monolithically integrated on an advanced silicon photonics platform. *J. Light. Technol.*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 1456–1462. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2893500>
- [18] Petrov V.M., Shamray A.V. SVCh integral'no-opticheskie modulyatory. Teoriya i praktika [UHF integrated optical modulator. Theory and practice]. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2021 (in Russ.).
- [19] Patrusheva T. N. Tekhnologii izgotovleniya komponentov oksidnykh solnechnykh batarey [Production technology for components of oxide solar batteries]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015 (in Russ.).
- [20] Amin R. et. al. 0.52 V mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics. *APL Photonics*, 2018, vol. 3, no. 12, art. 126104. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5052635>
- [21] Dingel B., Madamopoulos N., Prescod A. Adaptive high linearity intensity modulator for advanced microwave photonic links. In: *Optical communication technology*. IntechOpen, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69262>
- [22] Vekshin M.M. Issledovanie i modelirovaniye polarizatsionnykh volnovodnykh elementov mikro- i nanofotoniki. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Study and modeling of polarizing waveguide elements for micro- and nanophotonics. Kand. phys.-math. sci. diss.]. Krasnodar, KGU Publ., 2019 (in Russ.).

- [23] Xu P., Zheng J., Doylend J.K. et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches. *ACS Photonics*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 553–557.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01628>
- [24] Kim J.T., Choi C.G. Graphene-based polymer waveguide polarizer. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3556–3562. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.20.003556>
- [25] Zhang S., Li Z., Xing F. Review of polarization optical devices based on graphene materials. *Int. J. Mol. Sci.*, 2020, vol. 21, no. 5, art. 1608.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms21051608>
- [26] Eichler H., Eichler J., Lux O. Lasers. Basics, advances and applications. Springer, 2018.
- [27] Makarov M.E., Barabanenkov M.Yu., Ital'yantsev A.G. Intensity modulator based on SOI strip waveguide loaded by a Bragg mirror. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2018, vol. 1, pp. 534–538 (in Russ.).
- [28] Agrawal G.P. Applications of nonlinear fiber optics. Academic Press, 2020.
- [29] Popkov A.Yu. Vliyanie elektrofizicheskikh i geometricheskikh parametrov na chastotnye kharakteristiki poloskovykh napravlennykh otveteley so slaboy svyaz'yu. Diss. kand. tekhn. Nauk [Impact of electrophysical and geometric parameters on frequency characteristics of stripline directional coupler with loose coupling. Kand. tech. sci. diss.]. Tomsk, TUSUR RAN Publ., 2016 (in Russ.).

**Zheltikov V.A.** — Student, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Pasechnikova D.V.** — Student, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Hydyrova S.** — PhD student, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Moiseev K.M, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Zheltikov V.A., Pasechnikova D.V., Hydyrova S. Overview of electro-optical modulators in quantum optical integrated circuits. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 05(70).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-05-798.html> (in Russ.).