

ФОТОНИКА: МЕТОДЫ, КОМПОНЕНТЫ, СИСТЕМЫ

УДК 621.383

МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОММУТАТОРА
С ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛОВ И
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ© К. А. Вытовтов¹, Е. А. Барабанова¹, М. Г. Иванов¹,
Г. К. Вытовтов²¹*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65*²*Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
E-mail: vytovtov_konstan@mail.ru*

Предложена принципиально новая модель оптического коммутатора с децентрализованным управлением. Преимуществами предлагаемого коммутатора являются отсутствие оптоэлектронного преобразования информационного сигнала и возможность построения масштабируемых схем малой сложности. Схема коммутатора включает в себя следующие основные элементы: электрически управляемые ключи на основе ниобата лития, фильтры Брэгга, оптические вентили, фокусирующие системы, управляющую линзовую систему, локальную систему формирования управляющих сигналов. Проведённый расчёт оптических устройств коммутатора показал возможность его реализации и функционирования в диапазонах 1310–1460 нм для передачи управляющих сигналов и 1550 нм — для информационного сигнала, обеспечивающего взаимодействие устройств центров обработки данных.

Ключевые слова: оптический коммутатор, фильтр Брэгга, оптический мультиплексор, ниобат лития, коэффициент прохождения.

DOI: 10.15372/AUT20240512

EDN: EPOEWQ

Введение. В связи с повышением требований к пропускной способности и информационной безопасности каналов связи актуальной является разработка фотонных систем нового поколения [1–9]. В отличие от оптоэлектронных систем, предусматривающих электрооптическое и оптико-электронное преобразования сигналов в узлах коммутации, в фотонных или так называемых полностью оптических системах такое преобразование отсутствует, что существенно повышает скорость обработки информации. В настоящее время разработаны различные технологии построения полностью оптических коммутаторов: электромеханические, электрооптические, акустооптические, термооптические и др. [3]. Из них наиболее быстродействующими являются электрооптические системы, основанные на изменении свойств среды и направлении оптического луча при воздействии управляющего напряжения [3, 9]. При этом управление процессом коммутации может происходить как с использованием внешнего устройства, так и посредством локальных устройств управления оптического коммутатора. Недостаток внешнего управления — низкое быстродействие, ограниченное производительностью существующего электронного процессора [4]. Поэтому разработка оптических коммутаторов с децентрализованным управлением является актуальной задачей, несмотря на их большую схемную сложность [8]. В [8, 9] предложены электрооптические коммутаторы с децентрализованным управлением, в основе которых лежат отклоняющие системы с небольшим пространственным разнесением

оптических сигналов. Данный недостаток повышает вероятность ложного срабатывания устройства при попадании оптического сигнала в соседний канал.

В представленной работе предложена принципиально новая схема полностью оптического коммутатора с децентрализованным управлением и частотно-временным разделением сигналов, обеспечивающего большее пространственное разнесение сигналов, а значит, и большее переходное затухание. В основе коммутатора лежит масштабируемая система электрически управляемых оптических ключей, осуществляющая переключение сигналов между выходами коммутатора в зависимости от значений управляющих сигналов.

Цель данной работы — разработка модели оптического коммутатора с децентрализованной системой управления, функционирующего в диапазоне 1310–1550 нм. Управляющая информация, на основе которой локальные элементы управления коммутатором осуществляют процесс выбора канала передачи данных, заложена в заголовке оптических пакетов. Важной задачей данной работы является расчёт основных параметров элементов оптического коммутатора.

Структура и принцип действия. Предлагаемый коммутатор функционирует на основе принципа частотно-временного разделения каналов, согласно которому управляющие сигналы из заголовка оптического пакета и информационный сигнал передаются одновременно на разных частотах, при этом каждый пакет передаётся в своём временном интервале для исключения блокировок коммутатора [8]. Номер выхода задаётся комбинацией управляющих сигналов, количество которых определяется числом выходов коммутатора.

Коммутатор — масштабируемое устройство, базовым коммутационным элементом которого является система 4×4 , настраиваемая тремя управляющими сигналами (рис. 1). Базовый коммутационный элемент состоит из входных согласующих устройств 1–4, сигналы на которые поступают с оптических входов I–IV; оптического мультиплексора 5; системы фильтров Брэгга 6–8; формирователя управляющих сигналов 9; оптической коммутационной системы, состоящей из управляемых ключей 10–12 и полностью отражающего зеркала 13; фокусирующей системы 14–17; короткофокусной собирающей линзы 18; выходных согласующих устройств 19–22, через которые поступают сигналы на оптические выходы V–VIII.

Согласующие устройства 1–4 и 19–22 представляют собой оптоволоконные коллиматоры, необходимые для уменьшения как расходимости пучка при попадании из оптоволоконна в коммутатор, так и дисперсии после собирающей линзы 18.

Принцип действия коммутационного элемента рассмотрен на примере передачи информации с входа I на выход V. Оптический пакет, включающий в себя три управляющих сигнала на длинах волн λ_1 , λ_2 , λ_3 и информационный сигнал на длине волны $\lambda_{\text{инф}}$, поступает на вход I, а затем через согласующее устройство 1 — на оптический мультиплексор 5. С выхода мультиплексора 5 комбинация сигналов поступает на систему фильтров Брэгга 6–8. Фильтр Брэгга 6 выделяет управляющий сигнал на длине волны λ_1 для управления оптическим ключом 10, затем оставшаяся комбинация поступает на фильтр Брэгга 7, где выделяется управляющий сигнал на длине волны λ_2 для управления оптическим ключом 11, последний управляющий сигнал на длине волны λ_3 для ключа 12 выделяется фильтром Брэгга 8. Таким образом, с системы фильтров Брэгга на систему электрооптических ключей 10–12 поступает только информационный сигнал на одной длине волны. Управляющие сигналы с фильтров 6, 7 и 8 поступают на устройство формирования управляющих электрических сигналов 9, управляющее ключами 10, 11, 12. В данном случае эти ключи открываются, и информационный сигнал через 13 поступает на фокусирующую систему 17, затем — на собирающую линзу 18, согласующее устройство 19 и выход V.

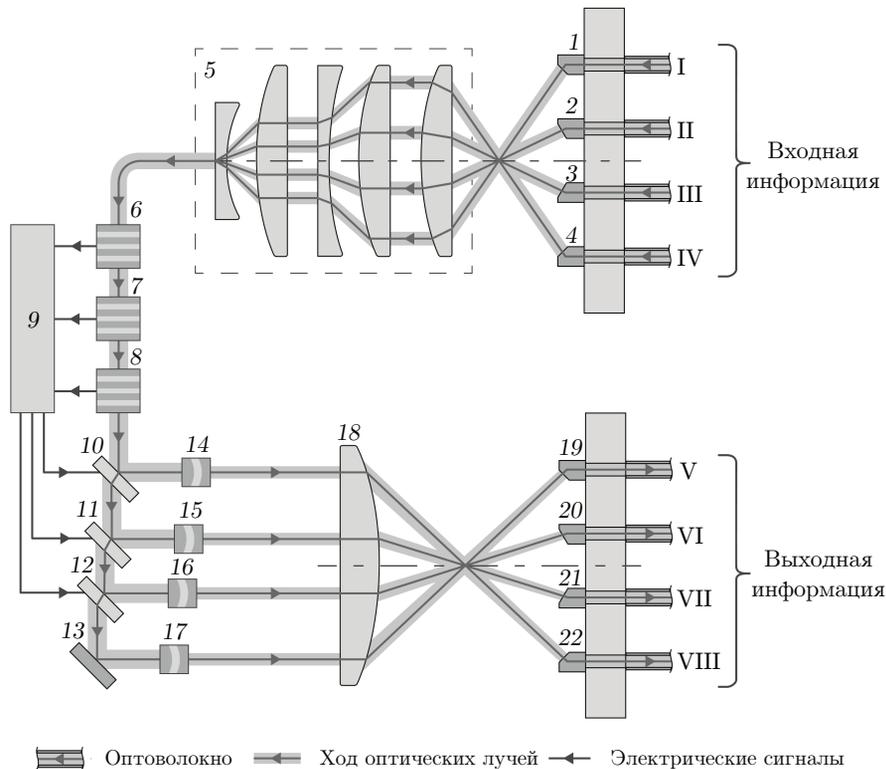


Рис. 1. Структурная схема полностью оптического коммутатора 4×4

В общем случае базовый коммутационный элемент может иметь N входов и N выходов. При этом требуемое пространственное разнесение входов и выходов обеспечивается выбором необходимых геометрических размеров входной и выходной линзовых систем 5 и 8 соответственно. Увеличение входов приводит к необходимости использования большего числа управляющих сигналов до $N - 1$, а значит, к расширению требуемой полосы пропускания системы связи, которая ограничивается окнами прозрачности. Чтобы исключить этот недостаток, можно использовать каскадное построение коммутаторов малой сложности, описанное в работе [8]. Действительно, построение коммутатора 16×16 по схеме, представленной на рис. 1, потребует 15 управляющих сигналов, а по схеме, описанной в [8] на базе данного коммутатора 4×4 , — шесть. Таким образом, предлагаемый коммутатор 4×4 может рассматриваться как базовый элемент коммутаторов большой ёмкости и малой сложности.

Оптические ключи. Оптические ключи 10–12, используемые в схеме коммутатора, выполнены на основе многослойной периодической структуры. Каждый период включает в себя слой обычного диэлектрика толщиной h_3 с показателем преломления n_3 , а также слой ниобата лития (LiNbO_3) толщиной h_2 с показателем преломления n_2 . Все слои ниобата лития соединены двумя электродами, представляющими собой тонкие проводящие пластины. При подаче на них управляющей разности электрических потенциалов $\varphi_U - \varphi_0$ коэффициент отражения структуры близок к единице, и падающая под углом θ_1 волна отражается. В отсутствие внешней разности потенциалов коэффициент отражения структуры близок к нулю, и волна проходит через структуру под углом θ_1 .

В расчётах коэффициента прохождения и отражения учитывается зависимость показателя преломления ниобата лития от напряжения [9] в виде $n_2 = n_0 - (rn_0^3/2l)U - (\zeta n_0^3/2l^2)U^2$, где $n_0 = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx 6,05$ [9], l — расстояние между электродами (в данном слу-

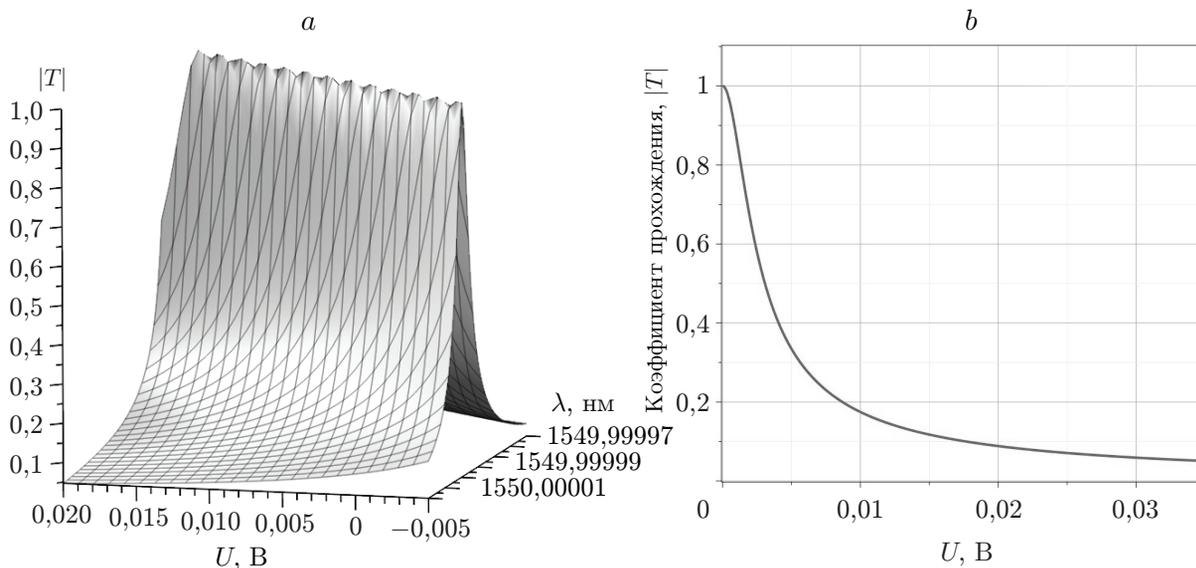


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения от напряжения и длины волны: *a* — в окрестности длины волны 1550 нм, *b* — на длине волны 1550 нм

чае $l = 5 \cdot 10^{-3}$ м), r — электрооптический коэффициент Поккельса ($r = 10^{-12} - 10^{-10}$ м/В), ζ — коэффициент Керра ($10^{-18} - 10^{-14}$ м²/В²), U — напряжение, прикладываемое к электродам.

Коэффициент прохождения подобной многослойной структуры находится с использованием метода матрицы преобразования [10]:

$$T = \frac{2\rho_0}{\rho_0^2 M_{21} + \rho_0 M_{11} + \rho_0 M_{22} + M_{12}}, \quad (1)$$

где ρ_0 — характеристическое сопротивление вакуума, M_{ij} — элементы матрицы 2×2 преобразования [10] слоистой структуры.

На рис. 2, *a* представлена зависимость коэффициента прохождения информационного сигнала от управляющего напряжения и длины волны, определяемого выражением (1) для структуры с параметрами $h_2 = 15 \cdot 10^{-6}$ м, $h_3 = 15 \cdot 10^{-6}$ м, $n_3 = 13$. Здесь угол падения $\theta_1 = \pi/4$, число периодов $N = 100$. По результатам расчётов видно, что структура обладает фильтрующими свойствами с резонансной длиной волны $\lambda = 1550$ нм. На рис. 2, *b* представлена зависимость коэффициента прохождения от внешнего приложенного напряжения при $\lambda = 1550$ нм. Из результатов расчёта видно, что при отсутствии внешнего напряжения ($U = 0$) модуль коэффициента прохождения составляет 0,997, ключ находится в открытом состоянии. При напряжении $U \geq 0,03$ В коэффициент отражения не превышает 0,048, оптический ключ переходит в закрытое состояние.

Оптический мультиплексор. Схема оптического мультиплексора представлена на рис. 3. В общем случае он состоит из собирающей линзы 1 и M пар собирающих и рассеивающих линз 2 и 3 соответственно. Здесь α_{in} — угол между лучами соседних входов, D_{in} — диаметр пучка на входе мультиплексора, θ_{in} — угол расхождения пучка на входе, D_{out} — расстояние между крайними пучками на выходе мультиплексора, θ_I — угол расхождения пучка на входе телескопа, θ_0 — угол расхождения пучков на выходе телескопа, L_{2-3} и L_{4-5} — рабочие расстояния телескопов Галилея, образованных парами линз 2 и 3, 4 и 5 соответственно. Величина h_1 — толщина линзы 1, F_1 — фокусное расстояние линзы 1.

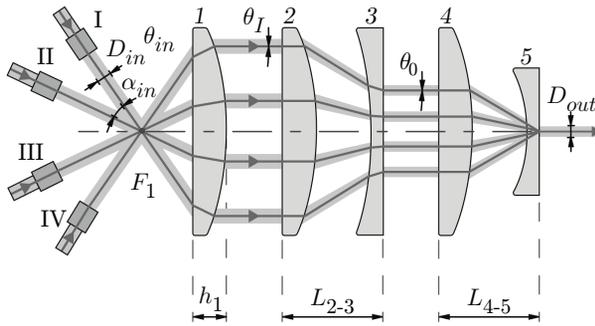


Рис. 3. Схема оптического мультиплексора

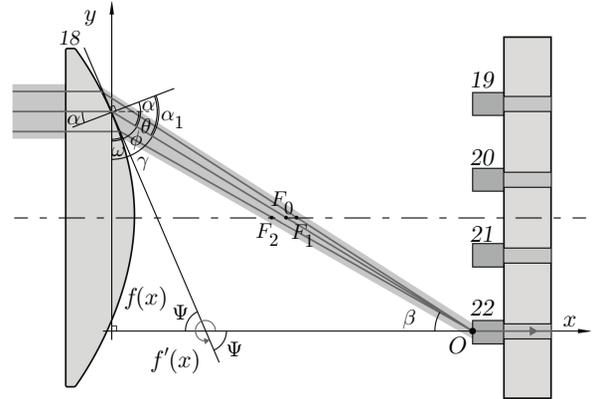


Рис. 4. Расчёт кривизны поверхности линзы

Выберем $F_1 = 50$ мм, тогда радиус кривизны линзы $R_1 = 30$ мм. Расстояние между соседними лучами после линзы 1 определяется выражением

$$l_i = F_1 \tan \left(\left(\frac{N+1}{2} - i \right) \alpha_{in} \right) + x_i \tan \beta_i,$$

где N — число входов коммутатора, i — порядковый номер входа (рис. 4), x_i — отклонение i -го луча вдоль горизонтальной оси, вычисляемое из уравнения

$$F_1 \tan \left(\left(\frac{N+1}{2} - i \right) \alpha_{in} \right) + x_i \tan \beta_i = \sqrt{R_1^2 - (x_i + (R_1 - h_1))^2},$$

где β_i — угол отклонения i -го луча в линзе 1, определяемый выражением

$$\beta_i = \arcsin \left(\frac{n_0}{n_1} \sin \left(\frac{N+1}{2} - i \right) \alpha_{in} \right),$$

где n_0 — коэффициент преломления внешней среды ($n_0 = 1$), n_1 — коэффициент преломления материала линзы ($n_{1-5} = 1,6$). В данном случае $N = 4$, $\alpha_{in} = 10^\circ$, $h_1 = 5$ мм, тогда расстояния между лучами на выходе линзы 1 равны $l_1 - l_2 = 9,049$ мм, $l_2 - l_3 = 9,255$ мм. Далее пучки света падают на линзы 2 и 3, 4 и 5, образующие телескопы Галилея. Выберем $F_2 = F_4 = 100$ мм, $h_2 = h_4 = 5$ мм, $F_3 = F_5 = -25$ мм, $h_3 = h_5 = 2$ мм, тогда рабочие расстояния телескопов будут выражаться формулой $L_{4-5} = L_{2-3} = F_2 + F_3 = 75$ мм. Используя формулу тонкой линзы, выразим радиусы кривизны линз: $R_2 = R_4 = F_2(n_2 - 1) = 60$ мм, $R_3 = R_5 = -F_3(n_3 - 1) = 15$ мм. Тогда диаметр пучка на выходе системы $D_{out} = 2l_i\Gamma = 1,71$ мм, где $\Gamma = \Gamma_{2-3} \cdot \Gamma_{4-5} = (-F_3/F_2)^2 = 1/16$. Оценим угол расхождения пучка на выходе системы θ_{out} . Для телескопа Галилея он определяется соотношением: $\theta_0 = \theta_I \Gamma_{2-3}$, где θ_I — угол расхождения пучка на входе телескопа, θ_0 — угол расхождения на выходе. Для рассмотренной системы расхождение определяется выражением $\theta_{out} = \theta_I \Gamma$, где θ_I равно

$$\theta_I = \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{-x_{0i} - R_1 + h_1}{\sqrt{R_1^2 - (x_{0i} + (R_1 - h_1))^2}} \right),$$

где x_{0i} находится из уравнения

$$x_{0i} \tan \left(\arcsin \left(\frac{n_0}{n_1} \sin \left(\frac{\alpha_{in}}{2} + \frac{\theta_{in}}{2} \right) \right) \right) + h_{xi} = \sqrt{R_1^2 - (x_i + (R_1 - h_1))^2}.$$

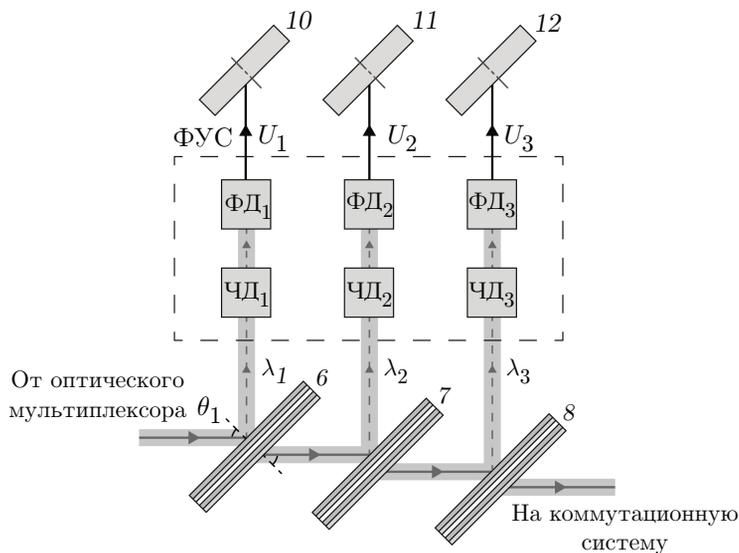


Рис. 5. Система фильтров Брэгга. Обозначения: ФУС — формирователь управляющих электрических сигналов, ФД — фотодиод, ЧД — частотный детектор

Таким образом, при выбранных параметрах линз и угле расхождения на входе $\theta_{in} = 0,05^\circ$, наибольший угол расхождения пучка не превысит $\theta_{outmax} = 0,15^\circ$, что определяет минимальные геометрические размеры устройств базового коммутационного элемента с учётом количества входов N .

Расчёт кривизны поверхности линзы. В схеме коммутатора линза 18 имеет рабочую поверхность особой формы, позволяющей направлять пучки, отстоящие друг от друга на некотором расстоянии, на один выход.

Рассчитаем кривизну поверхности линзы 18 в области падения пучков с разных входов, поступающих на один из выходов. Пусть $n_{л}$ — коэффициент преломления материала линзы, n_0 — коэффициент преломления воздуха. Геометрия задачи представлена на рис. 4. Необходимо найти математическое выражение, описывающее поверхность линзы, при которой пучки всех входных каналов будут сходиться в точке O , находящейся на некоторой плоскости за фокусом. На рис. 5 видно, что соответствующие углы равны

$$\beta = \arctan(f(x)/x), \quad \gamma = \pi/2 - \beta = \pi/2 - \arctan(f(x)/x), \quad \psi = 2\pi - f'(x),$$

$$\omega = \pi/2 - \psi = f'(x) - 3\pi/2, \quad \varphi = \gamma - \omega = 2\pi - \arctan(f(x)/x) - f'(x),$$

$$\theta = \pi/2 - \gamma = \arctan(f(x)/x).$$

Откуда угол преломления находим как

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi = \arctan\left(\frac{f(x)}{x}\right) + f'(x) - \frac{3\pi}{2},$$

а угол падения как

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi - \theta = f'(x) - \frac{3\pi}{2}.$$

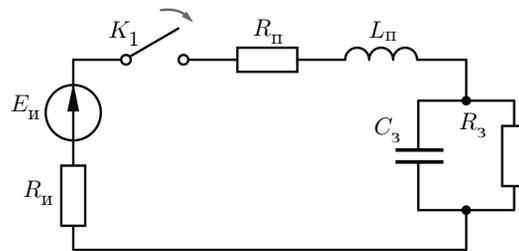


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема для расчёта переходного процесса

Тогда из закона Снеллиуса следует

$$n_{\text{л}} \sin \left[f'(x) - \frac{3\pi}{2} \right] = n_0 \sin \left[\arctan \left(\frac{f(x)}{x} \right) + f'(x) - \frac{3\pi}{2} \right]. \quad (2)$$

После тригонометрических и алгебраических преобразований выражения (2) получим нелинейное однородное дифференциальное уравнение первого порядка, которое описывает кривизну поверхности линзы в месте падения пучков, поступающих в один из выходных каналов:

$$f'(x) + \arctan \left[\frac{n_{\text{л}}}{n_0} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{f(x) - L} \right)^2} - \frac{x}{f(x) - L} \right] = 0. \quad (3)$$

Очевидно, что решение уравнения (3) возможно только численными или приближёнными аналитическими методами для каждого конкретного случая.

Расчёт фильтров Брэгга. Оптический пакет, состоящий из одного информационного сигнала, передаваемого на длине волны $\lambda_{\text{инф}} = 1550$ нм, и трёх управляющих сигналов, передаваемых на длинах волн $\lambda_1 = 1310$ нм, $\lambda_2 = 1370$ нм, $\lambda_3 = 1460$ нм, поступает на систему из трёх фильтров Брэгга I–III (см. рис. 5), которые последовательно отражают управляющие сигналы на длинах волн λ_1 , λ_2 , λ_3 соответственно. Управление оптическими ключами 10–12 осуществляет формирователь управляющих электрических сигналов ФУС, состоящий из трёх частотных детекторов ЧД₁–ЧД₃ и трёх фотодиодов ФД₁–ФД₃. Наличие или отсутствие оптических импульсов, передаваемых на каждой из управляющих длинах волн λ_1 , λ_2 , λ_3 , определяет амплитуды электрических сигналов U_1 , U_2 , U_3 , вырабатываемых фотодиодами ФД₁–ФД₃ (рис. 6) и подаваемых на оптические ключи 10–12 соответственно. В случае наличия оптического управляющего сигнала на заданной длине волны вырабатывается электрический сигнал напряжением 0,03 В, который определяет уровень сигнала логической единицы, отсутствие оптического управляющего сигнала соответствует напряжению логического нуля 0 В. Таким образом, комбинации управляющих электрических сигналов для передачи информации на заданный выход можно записать в виде: 1) на выход V: $\{U_1, U_2, U_3\} = \{1, 1, 1\}$; 2) на выход VI: $\{U_1, U_2, U_3\} = \{1, 1, 0\}$; 3) на выход VII: $\{U_1, U_2, U_3\} = \{1, 0, 0\}$; 4) на выход VIII: $\{U_1, U_2, U_3\} = \{0, 0, 0\}$.

Фильтры Брэгга I–III представляют собой многослойные структуры, состоящие из 100 периодов двухслойных плёнок немагнитного диэлектрика со следующими параметрами слоёв фильтра Брэгга I: $h_1 = 0,55$ мкм, $h_2 = 1,655$ мкм, $\varepsilon_1 = 3,3$, $\varepsilon_2 = 3,8$; фильтра Брэгга II: $h_1 = 0,55$ мкм, $h_2 = 2$ мкм, $\varepsilon_1 = 2,4$, $\varepsilon_2 = 3,3$; фильтра Брэгга III: $h_1 = 0,55$ мкм, $h_2 = 2$ мкм, $\varepsilon_1 = 3,1$, $\varepsilon_2 = 3,55$. Расчёт коэффициентов отражения фильтров Брэгга производится с использованием матрицы преобразования [10] для угла падения $\theta_1 = \pi/4$. Фильтр I выделяет первый управляющий сигнал на длине волны $1,31 \cdot 10^{-6} \pm 0,005 \cdot 10^{-6}$ м,

фильтр II — второй управляющий сигнал на длине волны $1,37 \cdot 10^{-6} \pm 0,005 \cdot 10^{-6}$ м, фильтр III — третий управляющий сигнал на длине волны $1,46 \cdot 10^{-6} \pm 0,005 \cdot 10^{-6}$ м, и только информационный сигнал на частоте $1,55 \cdot 10^{-6} \pm 0,005 \cdot 10^{-6}$ м проходит на систему ключей 10–12.

Оценка быстродействия коммутатора. Быстродействие оптического коммутатора определяется задержками, возникающими при распространении оптических лучей в элементах коммутатора, и временем установления управляющих зеркал в требуемое состояние. При этом задержки прохождения оптических лучей на несколько порядков меньше времени, требуемого для перевода управляемого зеркала из одного устойчивого состояния в другое. В этой связи для оценки быстродействия коммутатора необходимо представить цепь управления, состоящую из формирователя управляющих сигналов 9 и управляемого зеркала (10–12), в виде упрощённой эквивалентной электрической схемы и рассчитать время переходного процесса в этой цепи (см. рис. 6). Здесь $E_{\text{и}}$, $R_{\text{и}}$ — параметры источника ЭДС, задающего значение управляющего напряжения (U_1, U_2, U_3); $R_{\text{п}}$, $L_{\text{п}}$ — параметры, учитывающие влияние электрических проводников. Управляемое зеркало представлено как параллельное соединение ёмкости каждого слоя C_3 , образованной внешними электродами, и активного сопротивления слоя R_3 . Дифференциальное уравнение для нахождения выходного напряжения u_{c3} , снимаемого с оптического зеркала, имеет вид

$$\frac{d^2 u_{c3}}{dt^2} L_{\text{п}} C_3 + \frac{du_{c3}}{dt} \left(C_3 (R_{\text{п}} + R_{\text{и}}) + \frac{L_{\text{п}}}{R_3} \right) + u_{c3} \left(\frac{R_{\text{п}} + R_{\text{и}}}{R_3} + 1 \right) = E_{\text{и}}.$$

При выбранных параметрах элементов цепи $C_3 \approx 18 \cdot 10^{-12}$ Ф, $R_3 \approx 15 \cdot 10^{-3}$ Ом, $E_{\text{и}} = 0,03$ В, $R_{\text{и}} = 12$ Ом, $R_{\text{п}} = 0,998$ Ом, $L_{\text{п}} = 2,16 \cdot 10^{-9}$ Гн и взятых для примера нулевых начальных условиях $u_{c3}(0) = 0$ и $i_{L_{\text{п}}}(0) = 0$, соответствующих случаю замыкания ключа K_1 , время переходного процесса $t_{\text{пер}}$ составило около 5 пс.

Заключение. В данной работе предложена модель полностью оптического коммутатора, отличительной особенностью которого является отсутствие внешнего электронного управляющего устройства, что позволяет повысить его быстродействие. Авторами исследован коммутатор 4×4 , однако схема позволяет строить коммутаторы и на большее количество входов (выходов), которое определяется требованиями, во-первых, к вероятности ложного срабатывания за счёт попадания луча в соседний канал, во-вторых, к количеству управляющих сигналов, определяемому полосой пропускания канала связи. Предложенное устройство может быть использовано для построения высокопроизводительных центров обработки данных [11, 12].

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-29-00795, <https://rscf.ru/project/23-29-00795/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maier M., Ebrahimzadeh A., Beniiche A., Rostami S. The Art of 6G (TAO 6G): How to wire Society 5.0 // Journ. Opt. Commun. and Networking. 2022. 14, Iss. 2. P. A101–A112.
2. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанозлектромеханики // Автометрия. 2009. 45, № 3. С. 3–52.
3. Nandi D., Nandi S., Sarkar A., Sarkar Kumar C. Optical Switching: Device Technology and Applications in Networks. N. Y.: Wiley, 2022. 362 p.
4. Xue X., Calabretta N. Nanosecond optical switching and control system for data center networks // Nat. Commun. 2022. 13. 2257. DOI: 10.1038/s41467-022-29913-1.

5. **Chu T., Chen N., Tang W., Wu Y.** Large-Scale High-Speed Photonic Switches Fabricated on Silicon-Based Photonic Platforms // Proc. of the Optical Fiber Communication Conference (OFC). San Diego, USA, 5–9 March, 2023. DOI: 10.1364/OFC.2023.M4J.6.
6. **Kita T., Mendez-Astudillo M.** Ultrafast Silicon MZI Optical Switch with Periodic Electrodes and Integrated Heat Sink // Journ. Lightwave Tech. 2021. **39**, Iss. 15. P. 5054–5060.
7. **Barabanova E. A., Vytovtov K. A., Vishnevsky V. M., Podlazov V. S.** High-capacity strictly non-blocking optical switches based on new dual principle // Journ. Phys.: Conf. Ser. Bristol: IOP Publishing, 2021. **2091**. DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012040.
8. **Vytovtov K., Barabanova E., Zouhdi S.** Optical Switching Cell Based On Metamaterials And Ferrite Films // Proc. of the 12th Int. Cong. on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). Espoo, Finland, 27 Aug. – 1 Sept., 2018. DOI: 10.1109/MetaMaterials.2018.8534191.
9. **Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Ivanov M. G., Shalimova E. V.** Optical Antenna with Controlled Pattern for Atmospheric Link of Mobile Air Object // Proc. of the Int. Conf. on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). Astrakhan, Russia, 3–7 Oct., 2022. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976654.
10. **Born M., Wolf E.** Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.
11. **Nance Hall M., Foerster K.-T., Schmid S., Durairajan R.** A Survey of Reconfigurable Optical Networks // Opt. Switching and Networking. 2021. **41**. DOI: 10.1016/j.osn.2021.100621.
12. **Ben Yoo S. J.** New trends in photonic switching and optical networking architectures for data centers and computing systems // Journ. Opt. Commun. and Networking. 2023. **15**, Iss. 8. P. C288–C298.

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 03.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024
