УДК 621.391.64

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОММУТАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ПРЕДЛОЖЕННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЫСТРОЙ НЕРЕЛЯЦИОННОЙ КОММУТАЦИИ

[1]Виноградова И. Л., [2]Головина Е. Ю., [1]Зарипов Д. М.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате, e-mail: egolovina82@mail.ru

Современные телекоммуникационные системы требуют высокоскоростных и энергоэффективных оптических коммутаторов для обработки сигналов в условиях динамически изменяющихся нагрузок. Существующие решения, такие как механические, электрооптические, акустооптические и термооптические коммутаторы, обладают ограничениями по быстродействию и управлению, что делает их непригодными для задач оптической пакетной коммутации (OBS) и работы в сетях 5G/6G. Цель работы: Разработка волоконно-оптического устройства быстрой нереляционной коммутации на основе двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо (ДИФП) с гребенчатой структурой выходного зеркала, обеспечивающего высокую скорость переключения и возможность управления непосредственно через оптический сигнал. Используемые методы: В работе применены методы компьютерного моделирования (с использованием пакета HFSS) для оптимизации конструкции гребенчатого зеркала и анализа интерференционной картины в смесителе ДИФП. Также использованы аналитические подходы для расчета параметров устройства, включая градиент показателя преломления и резкость интерференционной картины. Новизна: Предложение конструкции ДИФП с гребенчатой структурой зеркала, обеспечивающей многопортовое переключение сигналов. Использование градиентного смесителя для компенсации искажений интерференционной картины. Реализация нереляционного управления, где управляющая информация передается через сам оптический сигнал. Результаты: Разработанное устройство демонстрирует возможность коммутации оптических сигналов с временем переключения до долей наносекунд, что соответствует требованиям современных высокоскоростных сетей. Моделирование подтвердило эффективность ступенчато-скошенной гребенчатой структуры для разделения сигналов с различными длинами волн. Практическая значимость: Устройство может быть применено в центрах обработки данных (ЦОД), сетях 5G/6G, а также в системах радиочастотной передачи (RoF) для управления антенными решетками. Реализация технологии позволит снизить энергопотребление и повысить скорость обработки данных, что особенно актуально для задач оптической пакетной коммутации и динамической маршрутизации.

Ключевые слова: волоконно-оптическая коммутация пакетов, двухрезонаторный интерферометр Фабри-Перо, оптический смеситель, градиент показателя преломления, дробное лямбда-переключение.

ANALYSIS OF EXISTING SWITCHING ELEMENTS FOR OPTICAL NETWORKS AND THE PROPOSED DEVICE FOR FAST NON-RELATIONAL SWITCHING

[1]Vinogradova I. L., [2]Golovina E. Yu., [1]Zaripov D. M.[1]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University"

[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Institute of Oil Refining and Petrochemistry FGBOU VO "USPTU" in Salavat, e-mail: egolovina82@mail.ru

Modern telecommunication systems require high-speed and energy-efficient optical switches to process signals under dynamically changing loads. Existing solutions such as mechanical, electro-optical, acousto-optical, and thermo-optical switches have performance and control limitations, making them unsuitable for optical packet switching (OBS) and 5G/6G networks. Objective: To develop a fiber-optic fast non-relational switching device based on a dual-resonator Fabry-Perot interferometer (DIFF) with a comb-like structure of the output mirror, providing high switching speed and the ability to control directly through an optical signal. Methods used: The paper uses computer modeling methods (using the HFSS package) to optimize the design of a comb mirror and analyze the interference pattern in a diffraction pattern mixer. Analytical approaches have also been used to calculate device

parameters, including the gradient of the refractive index and the sharpness of the interference pattern. Novelty: The proposed design of a diffraction pattern with a combed mirror structure that provides multi-port signal switching. Using a gradient mixer to compensate for distortion of the interference pattern. Implementation of non-relational control, where control information is transmitted through the optical signal itself. Results: The developed device demonstrates the possibility of switching optical signals with a switching time of up to fractions of nanoseconds, which meets the requirements of modern high-speed networks. The simulation confirmed the effectiveness of a stepped-beveled comb structure for separating signals with different wavelengths. Practical significance: The device can be used in data centers (data centers), 5G/6G networks, as well as in radio frequency transmission (RoF) systems for controlling antenna arrays. The implementation of the technology will reduce power consumption and increase data processing speed, which is especially important for optical packet switching and dynamic routing tasks.

Keywords: fiber optic packet switching, dual-cavity Fabry-Perot interferometer, optical mixer, refractive index gradient, fractional lambda switching

Введение

В настоящее время справедливо говорить о повышении интереса к оптической коммутации для телекоммуникационных систем. Наряду с расширением областей применения сетевых технологий, ставших уже традиционными: xWDM для уплотнения каналов (xWDM — обобщающий термин для технологий спектрального уплотнения каналов, где «x» заменяется на конкретный тип, например, CWDM (грубое уплотнение) или DWDM (плотное уплотнение)), λ-коммутации и маршрутизации, полностью оптической обработки сигналов, обеспечивающих перевод управления на нижние уровни для ускорения работы сетей [1], появляются и новые, не имевшие ранее аналогов, технологии и приложения. В отношении последнего можно привести два характерных примера. Это: 1) технология beamforming в 5/6G наряду с использованием оптически управляемых антенных решеток для радиосетей миллиметрового диапазона [2, 3] самого разного назначения, и 2) оптические коммутационные системы в центрах обработки данных (ЦОД) [4].

В первом примере – в связи с увеличением частоты радионесущей снижается ее способность проникновения в городскую инфраструктуру, а значит, согласно [2], это приводит к необходимости использования высоконаправленной радиопередачи и работы с узкими лучами. Что в свою очередь требует быстрой динамической перенастройки элементов антенной решетки для корректного поддержания нескольких направленных лучей в системе, например, с MIMO. Причем сказанное актуально как для передающей, так и для принимающей стороны, отслеживающей луч. Если быстродействие окажется недостаточным, то может иметь место потеря связи в мобильных сетях mmWave UDN (Ultra-dense networks – сверхплотные сети), которым свойственно динамическое изменение топологии и так называемый сервис «нарезки услуг» (service-aware slicing) [2]. Учитывая критический характер зависимости времени переключения в оптической схеме на формирование радиолуча, в настоящее время разрабатываются даже специализированные алгоритмы управления решателем [5], призванные минимизировать задержку передачи в коммутационной части радиосистемы (fronthaul [6]) для mmWave UDN / C-RAN.

Во втором примере с коммутационными схемами ЦОД, по мнению авторов [4], электронным коммутаторам на смену неизбежно должны прийти оптические. Причем требование по быстродействию – до «субволнового времени» [4] на установление соединения, обусловлено необходимостью работать также и в режимах всплесков трафика. Причем указанное требование неуклонно повышается наряду с необходимостью повышения энергоэффективности устройств переключения. Сюда же можно отнести и задачу оптической пакетной коммутации (Optical Burst Switching – OBS) как для ЦОД, так и других типов высокоскоростных сетей. В [7] подчеркивается, что эффективное снижение накладных расходов на управление в режиме с OBS может обеспечиваться применением коммутаторов с временами реконфигурации до 1 нс, в то время как на сегодняшний день в соответствии с [3] ультранизкой задержкой уже считается время в пределах 0,1 мс. Последнее явно не обеспечивает условие эффективной работы с OBS. Поэтому разрабатываемые оптические схемы коммутации для ЦОД [8] используют существующее оборудование xWDM с устройствами разделения по длинам волн, основанными на циркуляторах и оптоволокнах Брэгговского типа с большой шириной спектра – до нескольких микрометров!, (рис. 1). Но даже и такие решения, согласно [8], позволяют повысить эффективность работы ЦОД.

Анализируя сказанное, можно сделать два характерных заключения: 1) обладает актуальностью задача разработки высокоскоростных и энергоэффективных оптических переключателей/коммутаторов, управление которыми выполняется также оптическим способом. И самый лучший вариант, если это управление – не

реляционное [9], т.е. управляющая информация/воздействие переносится в самом переключаемом потоке/сигнале. Наличие подобных переключателей позволит кардинально изменить саму инфраструктуру высокоскоростных сетей, что значительно превзойдет по итоговой эффективности применение всевозможных вспомогательных средств, таких как ускоряющие коммутационные алгоритмы для решателя, алгоритмы, комбинирующие преобразование длин волн с волоконно-оптическими линиями задержки, протоколы маршрутизации отклонения [4, 5, 7], и подобные средства.

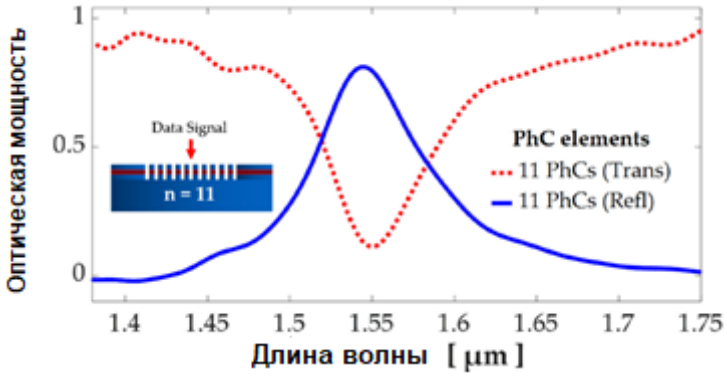


Рисунок 1 – Пример спектральной характеристики оптического устройства коммутации в ЦОД. Инвертирование спектра (пунктирная и непрерывная линии) связано со спецификой схемотехники коммутации в [8] (взято из [8])

И 2) напрашивается классификация рассматриваемых устройств на: *коммутаторы оптических потоков* (или каналов), к классу которых можно отнести подавляющее большинство применяемых на оптических сетях в настоящее время переключателей, и *коммутаторы оптических сигналов* (или пакетных сообщений, т.е. пакетов). Очевидно, что быстродействие последних должно быть весьма высоким – время на установление соединения не превышать долей наносекунд, и менее, что обусловлено короткой длительностью пакета/байта/бита в современных сетях.

Краткий обзор известных оптических переключателей/коммутаторов

Над созданием устройств переключения (перенаправления) оптических потоков для волоконно-оптических сетей (ВОС) работы ведутся достаточно давно, и к настоящему моменту уже разработано и серийно изготавливается целая линейка моделей [10]:

1. механические оптические коммутаторы с механически перемещающимся элементом, коммутирующим световой поток от входных оптических портов к выходным. Таким коммутирующим элементом может быть поворачиваемый отрезок оптического волновода, призма, зеркала (3D микроэлектрические механические переключатели – MEMS) или направленный звездообразный/древовидный разветвитель с переменным коэффициентом связи. Для перемещения элемента обычно используют пьезоэлементы или шаговые двигатели. Известные модели, как правило, малоактуальны для информационных потоков ВОС за исключением оборудования тестирования и мониторинга, включая – средства служебной связи;
2. электрооптические коммутаторы, основанные на изменении коэффициента связи под действием приложенного напряжения за счёт электрооптического эффекта, например, в направленном разветвителе, либо в матрице дисплеев на жидких кремниевых кристаллах (LCoS), фокусирующем световой поток на одном из выходных портов устройства. Известные модели обеспечивают скорости переключения до 108–109 Гц с низким управляющим напряжением (5–10 В);
3. акустооптические коммутаторы, основанные на дифракции света на акустических волнах, представляющих собой фазовую дифракционную решетку неоднородностей показателя преломления, движущуюся со скоростью звука. Последняя генерируется, как правило, пьезоэлектрическим устройством в такой акустооптической ячейке. Управление достигается тем, что при изменении частоты звуковой волны изменяется и угол отклонения (дифракции) световой волны относительно угла падения;
4. термооптические коммутаторы, базирующиеся на изменении коэффициента преломления рабочей среды под действием температуры с последующим анализом фазы проходящего излучения, например, в интерферометре Маха-Цендера. Недостатком таких переключателей является относительно высокое энергопотребление и невысокие скорости выхода на режим.

Перечисленные типы моделей так или иначе используются для ВОС, но с точки зрения рассматриваемой задачи их, скорее можно отнести к коммутаторам оптических потоков (некоторое исключение составляют электрооптические), к тому же ни о каком оптическом управлении не может идти речи. Кроме того, они являются реляционными, т.е. требуют отдельно подаваемого (передаваемого) управляющего воздействия. Последнее не только неизбежно будет занимать телекоммуникационный ресурс, но и потребует специализированного устройства (например, преобразователя оптика/электричество если все же передается по оптической сети в виде служебного сигнала), либо, что еще сложнее – специализированного канала передачи.

Близкой технологией к рассматриваемым примерам является построение так называемого оптического (волоконно-оптического) суперканала [11], когда единым чипом (суперканальной линейной картой – СЛК) управляется передача клиентских данных и устанавливаются значения несущих оптических длин волн. С точки зрения линейного сигнала, это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов (ближе, чем того требует G.694! (рекомендация ITU-T, которая определяет типовые шаги между каналами DWDM)), которые при прохождении по ВОС должны управляться оптическими маршрутизаторами и коммутаторами как единое целое. Предполагается также, что СЛК при реконфигурировании изменяет не какую-либо одну несущую, как это классически свойственно xWDM, а всю совокупность несущих в целом, что значительно упрощает алгоритм и схему управления, а значит – увеличивает и скорость переключения.

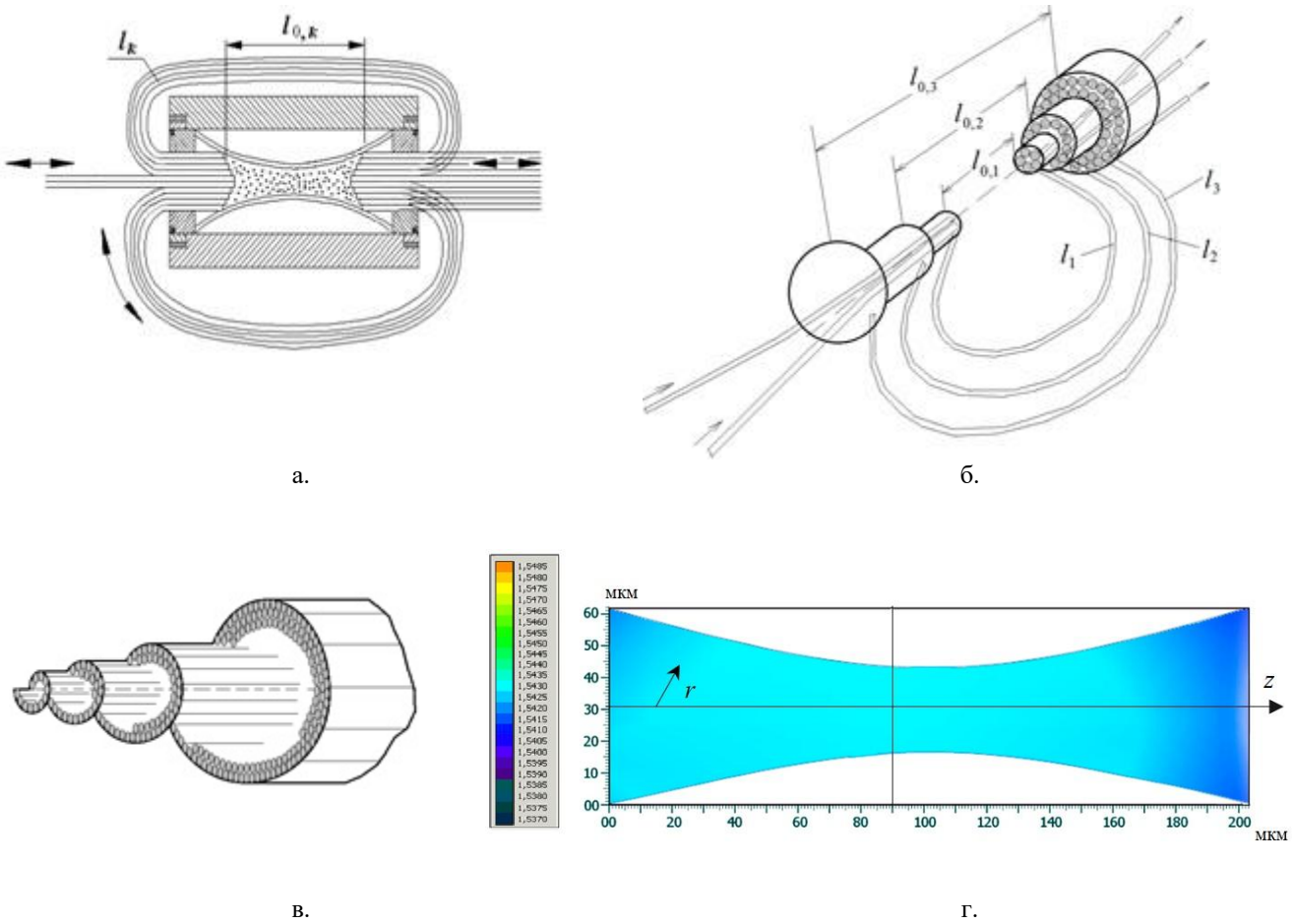
Очевидно, что технология суперканала ориентирована на высокоскоростные ВОС и в настоящее время успешно справляется с данной задачей. Но, во-первых, система не является полностью оптической и характеризуется реляционным управлением, и, во-вторых, классифицируется как коммутатор потоков/каналов. Хотя, возможно, по быстродействию СЛК и могла бы обеспечить коммутацию пакетов в городских сетях (категории MAN [8]: xPON, FTTH и подобных), но аппаратно она сугубо для этого не предназначена. К тому же технология СЛК работает при поддержке буферизации [11].

Сказанное выше свидетельствует о назревшей необходимости в разработке оптических устройств, коммутирующих сигналы/пакеты. В связи с чем телекоммуникационными научными группами предлагаются подходы к построению так называемых «быстрых оптических переключателей» [12-16 и др.] (Ultrafast All-Optical Switching), по тематике которых уже не мало публикаций. Принцип работы устройств в основном базируется на эффекте изменения связи мод в субволновых решетчатых и фотонно-кристаллических структурах за фемтосекундные времена и даже быстрее. Такие переключатели успешно смогут применяться в квантовых оптических сетях и для внутричиповых решений, в которых переключение фактически сводится к перенаправлению *единственного фотона*. Для многофотонных сигналов, свойственных всем видам существующих сегодня ВОС, для которых регламентирована мощность согласно G.703— стандарту ITU-T, который определяет электрические и оптические интерфейсы для передачи цифровых сигналов, в отличие от G.694.1, регламентирующего только сетку оптических частот; для оптических интерфейсов G.703 устанавливает, например, типичный уровень мощности порядка 1 мВт), представленные в [12-16] и подобных источниках принципы коммутации вряд ли окажутся применимыми. К тому же подобные схемы могут работать в режиме «включено-выключено», или в лучшем случае – к выбору одного из двух направлений. Следовательно, для построения многопортовых коммутаторов понадобилось бы их каскадное включение (это же касается и многих других моделей, представленных выше), что неизбежно усложнит не только конструкцию, но и управление устройством.

Волоконно-оптическое устройство для быстрого полностью оптического переключения

Узкоспектральное волоконно-оптическое устройство, реализующее метод быстрого полностью оптического переключения, может быть построено на базе двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо (ДИФП), рис. 2. Здесь предполагается, что переключение (перенаправление) сигнала происходит исходя из его функции чирпа по аналогии с [19], управление которым выполняется на ранее расположенном элементе. Например, это может быть нелинейное специализированное оптоволокно, в котором функция чирпа подстраивается исходя из мощности оптического сигнала [18]. Как показали ранее выполненные исследования [20], ДИФП обладает несколько большей резкостью интерференционной картины ζ а значит – и большей разрешающей способностью, в сравнении с классическим ИФП. Указанное свойство обусловлено наличием второго, связанного с первым (основным), резонатора – в виде волоконно-оптической петли обратной связи. Величина $\zeta_{ДИФП}$ зависит от соотношения мощностей в первом P_1 и во втором P_2 резонаторах. Максимальное значение $\zeta_{ДИФП}$ достигается, согласно [20], при

P_1/P_2 ~ 2,7…2,8. Чтобы ДИФП получился многопортовым, главным образом – с большим количеством выходных световодов, например, для оптического управления АР [17], выходной торец (рис. 2) должен быть образован не единственным на выход (учитывая обязательно присутствующие торцы второго волоконного резонатора, образованного дополнительными световодами), а многими световодами, как и показано на рис. 2. Если все световоды как на входном, так и выходном торце, выставлены в соответствующих единых плоскостях, после чего отполированы с нанесением отражающего покрытия, то ДИФП получится с плоскими зеркалами. Если же световоды на торце (торцах) собраны со смещением, как показано на рис. 2, то устройство будет спектрально избирательным и может либо вносить чирпирование в сигнал (если световоды второго резонатора также выставлены со смещением и имеют различные длины [21]: например, $l_1 < l_2 < l_3$), либо разделять входной сигнал исходя из значения мгновенной длины волны $\lambda_{мгн}$, т.е. функции чирпа $C_\lambda(t)$ [18].



а. б.

в. г.

Рисунок 2 – ДИФП с неплоскими (гребенчатыми) торцами смесителя (а) и его конструктивные элементы: (б) – ступенчато-гребенчатые торцы с входными, выходными и дополнительными световодами, образующими второй резонатор (входных может быть более 1 в зависимости от сетевого приложения), входной торец смесителя (он же – первое зеркало), и выходной торец смесителя (второе зеркало); (в) – пример спирально-гребенчатого торца; (г) градиент показателя преломления смесителя из [21]. Сам по себе второй резонатор не является высокодобротным, и если $l_1 = l_2 = l_3$, то какой-либо дополнительной задержки в сигнал вноситься не будет, а резонирование будет происходить и для незначительного отличия длин волн

Очевидно, что ДИФП с гребенчатыми торцами может характеризоваться большей сферой практических приложений, нежели с плоскими. Но в этом случае зеркало интерферометра является сложным, которое только в самом первом приближении можно рассматривать как конически-наклонное [22] – при малых и близко расположенных ступеньках гребенки. Если ступеньки крупные (порядка λ_0 и более), то зеркало приобретает рельефную фактурную структуру, которая, очевидно, усугубляет разрушение конструктивной интерференции. Для компенсации указанного явления, материал смесителя ДИФП предложено изготавливать неоднородным – с

градиентом показателя преломления κ, рассчитанным в ранних исследованиях [21] (κ = grad($n(r, z)$), рис. 2), обеспечивающим восстановление стройного порядка гребней стоячей волны в смесителе (даже вблизи сложных зеркал) подобно тому, что свойственно ДИФП с плоскими зеркалами. В [23] предложен подход к получению материала неоднородного смесителя – с применением специальным образом обработанного двухфазного ситаллового стекла.

Здесь же подробнее остановимся на проектировании световодной гребенчатой структуры (гребенки), составляющей основу зеркал (зеркала) ДИФП, обеспечивающей с одной стороны эффективное разделение по выходным световодам чирпированного оптического сигнала в диапазоне 0,001….0,01 нм (см. таблицу 1), с другой стороны вносящей наименьшие искажения в интерференцию. Последнее обеспечит необходимость в меньшем значении κ, что в конечном итоге будет способствовать удешевлению устройства.

Таблица 1 – Сравнение диапазонов длин волн для использования чирпированного сигнала в RoF-сети

	Возможное значение $C_{\lambda,\max} = \Delta\lambda_{\max}$ (вблизи λ_0 = =1550 нм)	Соответствующая отстройка радиочастоты для схемы [17]	Специфика	Используем/ не используем
1	1 нм	125 ГГц	Δλ *является* отдельным λ-каналом в xWDM (по G.957 ширина спектральной линии Δ не должна превышать: Δ = 0,5 нм для STM-16; 0,1 нм для STM-64+CWDM и 0,08 нм для STM-64+DWDM)	—
2	0,5 нм	62,5 ГГц		
3	0,05 нм	6,25 ГГц		
4	0,005 нм	625 МГц	Δλ *не является* отдельным λ-каналом в xWDM; при этом возможна работа радиоканала – с компенсатором дрейфа несущей (например, см. [24])	✓
5	0,0005 нм = $=5\cdot10^{-4}$ нм	62,5 МГц	*существенное повышение сложности изготовления и стоимости устройства*	—

В связи с тем, что аналитически расчет параметров гребенчатого торца вряд ли можно выполнить эффективно, т.е. с получением сходящегося решения и точностью, составляющей хотя бы порядок точности входных данных, то целесообразно воспользоваться моделирующим компьютерным пакетом. Здесь следует сделать пояснение: аналитический расчет амплитуды (электрической напряженности поля световой волны) $\dot{\vec{E}}$ в рамках метода, базирующегося на приближении о медленно изменяющейся амплитуде [18], предполагающего отбрасывание вторых производных от E как по координатам ($\partial^2 E/\partial r^2 \approx 0$, $\partial^2 E/\partial z^2 \approx 0$), так и по времени ($\partial^2 E/\partial t^2 \approx 0$), хорошо работающий для протяженной световодной структуры, вряд ли позволит получить приемлемую точность решения в рассматриваемой задаче. Аналитическое интегрирование уравнений второго порядка («в лоб») в граничных условиях, соответствующих конструкции рис. 2, также не представляется возможным, в то время как численное интегрирование и является основой функционирования большинства соответствующих компьютерных пакетов. В данном случае был выбран пакет HFSS, позволяющий задавать как сложные конфигурации (с загрузкой чертежа из пакета AutoCAD), так и неоднородные области с требующимся градиентом, с возможностью последующей оптимизации конструкции (в том числе – и при решении обратной задачи).

Из-за того, что пакет HFSS ориентирован на моделирование СВЧ-систем (базируется на методе конечных элементов), то для применения его к оптической структуре (в основу многих специализированных пакетов: Lumerical, COMSOL, MEEP, Tidy3D и подобных, заложен метод конечных разностей во временной области (FDTD)) сначала было выполнено сравнение результатов счета первого прогона в реперных точках с полученными ранее аналитическими результатами [17]. Результат сравнения удовлетворил авторов. Размеры конструкции задавались исходя из пропорционального пересчета, что обосновывается линейностью явления интерференции. Так показатель преломления n задавался через диэлектрическую проницаемость как $n \cong \sqrt{\varepsilon}$ при $\mu = 1$; зеркала обозначались как объекты с электропроводностью σ: для оптического коэффициента отражения $\rho = 1$ коэффициент σ задавался равным 0,098 См/м, что свойственно для железа; для $\rho = 0{,}9$ задавалось $\sigma = 0{,}075$ См/м (подобно GaAs-ным структурам), и так далее. Частота входного поля в расчетах была выбрана равной 30 ГГц, т.е. с

$\lambda_{вх}$= 1см. Если в ВОС обычно λ_0 = 1550 нм, то коэффициент пересчета получился равным: K = 6452.

Компьютерное моделирование проводилось следующим образом. Сначала было рассчитано поле (стоячая волна) в резонаторе – смесителе ДИФП, обладающим плоскими зеркалами, рис. 3, с последующей выгрузкой данных в отдельный вспомогательный файл.

Затем в режиме решения обратной задачи полученное поле заводилось в другой файл – с конструкцией ДИФП, содержащей гребенчатое выходное зеркало, и рассматривалось как желаемый результат, т.е. задавалось на первом шаге итерации. Все расчеты проводились только для одного (выходного) гребенчатого зеркала, другое (входное) оставалось плоским. В случае, если выставить оба зеркала гребенчатыми, то не удавалось получить сходящегося решения ни при каком κ. Далее в программе запускался процесс параметризации (выявление наиболее значимых параметров искомой структуры – световодной гребенки), а уже затем – процесс оптимизации по найденным параметрам. При оптимизации задавался критерий ϑ минимального отличия ширины получаемых гребней стоячей волны h относительно изначальной их ширины h_0, соответствующей случаю плоских зеркал, рис. 3, т.е. $\vartheta = \min\left|h - h_0\right|$.

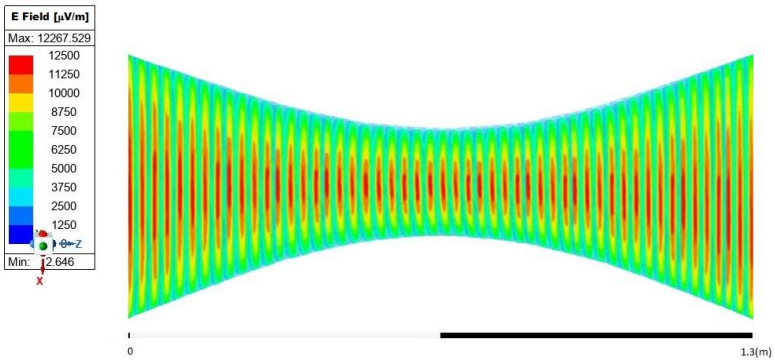


Рисунок 3 – Стоячая волна в смесителе ДИФП с плоскими зеркалами: характеризуется параллельно расположенными гребнями волны (показаны 1 через 8 для наглядности), свидетельствующими о наличии конструктивной интерференции. Результат представлен для коэффициента отражения зеркал $\rho = 0{,}85$ (пояснения см. далее)

Величина h, как известно [22], определяет резкость интерференционной картины, которую и требовалось по-возможности сохранить для ДИФП со сложным зеркалом. Кроме того, при моделировании ДИФП со сложным зеркалом отслеживался порядок следования гребней стоячей волны (не допускалось их соединение или расщепление), возможен был только некоторый изгиб – в соответствии с изогнутостью зеркала.

Рассматривались световодные гребенки двух видов – ступенчатая и спиральная, рис. 2, в последней предполагалось размещение световодов без их ступенчатого смещения, но с полированием световодных торцов под углом < 90 град к оси световода. Это позволяло снизить потери на рассеяние в интерференционной картине, так как фактически имело место плоское наклонное зеркало в каждой точке без ребристости структуры, что увеличивало её резкость при аналогичных параметрах по сравнению со случаем ступенчатой гребенки, а значит – позволяло уменьшить κ.

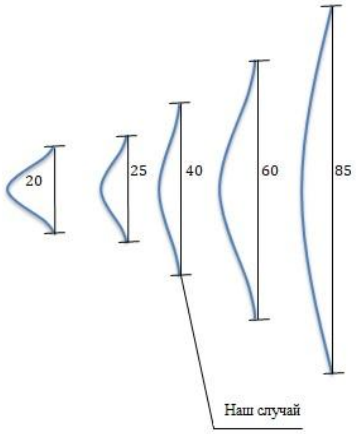


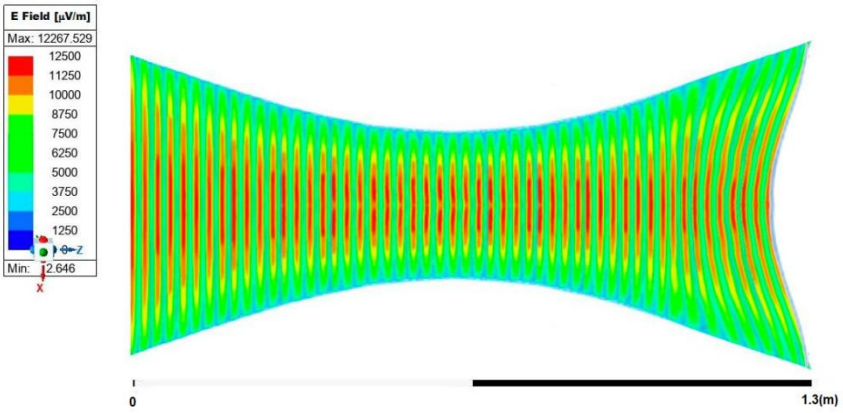
Рисунок 4 – Найденные формы для выпукло-изогнутого гребенчатого зеркала ДИФП для различных его диаметров.

Значимые параметры, выявленные при параметризации в HFSS: 1) градиент показателя преломления вблизи зеркала, 2) длина и ширина выступающей узкой части («носика») по отношению к диаметру основания, 3) соотношение длины «носика» и общей высоты выпуклости также с учетом диаметра. В расчетах предполагалось, что шероховатость (ребристость) зеркала отсутствует. Установлено также, что коэффициент отражения зеркал в пределах $\rho = 0{,}85...0{,}95$ (задаваемый в HFSS через σ) слабо влиял на результат

Проектирование гребенки выполнялось следующим образом: сначала находилась ее общая форма, рис. 4, обеспечивающая наименьшее искажение интерференционной картины, в том числе – и при изменении длины волны в выбранном диапазоне. В процессе моделирования выполнялось также и небольшое вариирование показателя преломления вблизи данного зеркала, что позволило получить уточненное κ^* по отношению к [21], также способствующее минимизации ϑ.

Было установлено, что такое зеркало должно содержать характерный перегиб: с увеличением диаметра точка перегиба удаляется от оси, а сам перегиб уменьшался вплоть до его исчезновения. Для малых диаметров наоборот, перегиб становится более выраженным, а «носик» – более вытянутым, рис. 4. При этом для различных диаметров такое изогнутое зеркало должно содержать плоский (хотя бы небольшой) «торец носика». Для пропорционального (по отношению к [21] смесителя, см. рис. 2, т.е. с длиной 1,3 м при расчетах в HFSS) его диаметр в области выходного торца должен составлять примерно 38,7см для $\lambda_{вх}$ = 1см.

Затем для найденных – формы выпукло-изогнутого зеркала и κ^* вновь выполнялось построение интерференционной картины – гребней стоячей волны, рис. 5. Был получен следующий результат: вблизи сложного зеркала гребни соответствующим образом также претерпевают изгиб, некоторое расширение (увеличивается h), усугубляющееся к основанию зеркала (т.е. для бóльших r) вплоть до полного их пропадания, и расщепление. Последнее проявлялось значительнее также для бóльших r и становилось заметным для ρ свыше 0,9.



а.

б. в.

Рисунок 5 – Стоячая волна в смесителе ДИФП с выходным оптимизированным сложным зеркалом (а), характеризуется изогнутыми гребнями стоячей волны вблизи сложного зеркала: (б) для меньших длин волн (в

расчетах λ_1 = 1 см, соотв. $\lambda_0 \cong$ 1,5499 мкм) и (в) для бóльших длин волн (λ_2 = 1,01 см, соотв. $\lambda_0 \cong$ 1,5654 мкм); ρ=0,85. В примере для наглядности λ_1 существеннее отличается от λ_2, чем требуется в задаче

Изменение длины волны несколько меняло картину: для более коротких волн эффект оказывался выраженным сильнее, чем для более длинных. Поэтому далее с целью уменьшения наблюдаемого, вновь выполнялся подбор κ (вариированием только вблизи сложного зеркала, не далее 20 лямбд от «носика», чтобы не увеличивать чрезмерно время счета). Так был получен итоговый градиент показателя преломления κ**, обеспечивающий наименьшее разрушение интерференционной картины в рассматриваемой конфигурации. Он получился, в отличие представленного на рис. 2 г), несколько уменьшающимся к самому зеркалу. Но даже и при последующем установлении κ**, описанное выше влияние длины волны сохранялось. Поэтому в отношении структуры световодной гребенки был сделан следующий вывод: для выведения (выделения) сигнала на коротких волнах необходимо выполнять резонирование с гребенчатой структурой интерферометра у самого ее «носика», так как дальше к ее основанию интерференционная картина уже разрушается. Для несколько более длинных волн интерференционная картина имеет стройный вид не только около «носика», но и немного дальше, т.е. продолжает сохраняться с ростом r. С еще большим увеличением длины волны процесс сохранения стройности интерференционной картины к основанию сложного зеркала продолжается. Откуда ясно, что проектирование гребенки необходимо выполнять исходя из следующего:

а) выходные торцы световодов для отведения более коротких волн из ДИФП должны устанавливаться ближе к «носику» гребенки (ступенька 1 на рис. 6; каждая ступенька содержит несколько ярусов световодных торцов, образующих концентрические кольца относительно оси устройства),

б) выходные световоды, отводящие более длинные волны – далее от «носика» к основанию гребенки (ступенька 2);

в) еще более длинные волны – еще дальше к основанию (ступенька 3), а также

г) необходимо размещение торцов дополнительных световодов (образующих второй резонатор), обеспечивающих разделение мощностей в приведенном выше соотношении (P_1 / P_2 ~ 2,7…2,8), из которого пропорциональным пересчетом можно получить, что дополнительных световодов суммарно должно быть примерно в 2 раза больше, чем выходных с каждой ступеньки для $\rho = 0{,}85$. При изменении ρ эта пропорция, очевидно, меняется. На рис. 6 представлена схема объединения выходных и дополнительных световодов в гребенчатую структуру, соответствующая представленным соображениям.

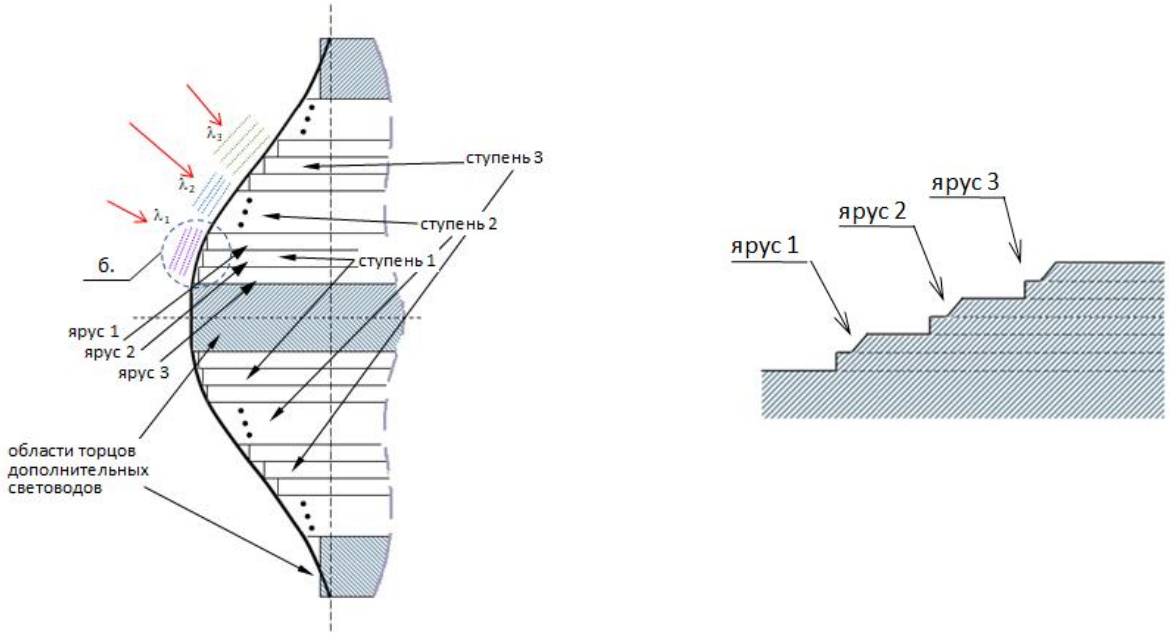
Нетрудно установить, что если собирать гребенку из 3-х многоярусных ступенек, ориентированных на соответствующие длины волн, то соотношение суммарного количества выходных световодов к количеству дополнительных световодов окажется в пропорции как ~1,665/1. Если с каждой ступеньки отводить по 30…50 шт. световодов, то во второй резонатор потребуется порядка 100 световодов. Их предлагается размещать на самом «носике» гребенки и около ее основания, так как в данной задаче не требуется получения спектральной избирательности второго резонатора. Каждая ступенька (в случае ступенчатой структуры гребенки), как уже упоминалось выше, образована несколькими ярусами с характерным смещением d, зависящем от выводимой длины волны данной ступенькой (определяется расстоянием между гребнями стоячей волны и будет обсуждаться далее). Каждый ярус может состоять из нескольких слоев, и ввиду того, что гребни стоячей волны являются наклонными к оси устройства в области торцов выходных световодов, то предложено полировку указанных торцов в ярусах также выполнить под углом < 90 град к оси устройства (по аналогии со спиральным способом размещения, т.е. со скошенностью) – в соответствии с расположением стоячей волны в данной области.

Для построения устройства целесообразно использовать световоды уменьшенного диаметра (4 мкм [25]) также с уменьшенным (сточенным) диаметром оболочки. Либо вообще изделие-гребенку выполнять не в виде волоконной сборки, а в виде цельно-литого изделия (например, литографическим способом [26]), а световоды приклеивать уже затем к его основанию.

Ступенчатая гребенка, по мнению авторов, лучше спиральной ввиду того, что выведение заданных длин волн выполняется установленным, предсказуемым образом. В то время как спиральная гребенка, согласно результатам моделирования, хотя и обеспечивает несколько меньшие потери, но выводит длины волн хаотично по выходным световодам. Из-за чего трудно спроектировать устройство, распределяющее заданные длины волн из чирпированного сигнала, например, на заданные элементы фазированной антенной решетки (ФАР) [19]. Кроме того, ступенчатая гребенка обеспечивает бóльшую мощность выведенного сигнала на заданной длине волны.

Поэтому окончательно решено остановиться на ступенчато-скошенной конструкции гребенки, рис. 6, взяв достоинства как спирального, так и ступенчатого вариантов построения.

Можно сказать, что описанное здесь устройство: волоконно-оптический ДИФП с профилированным смесителем и оптимизированной многопортовой световодной гребенкой на выходном зеркале – является нереляционным переключателем оптических сигналов (чирпированных импульсов), либо – пакетов, когда функция чирпа $C_\lambda(t)$ меняется не в пределах одного импульса (например: $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2 \rightarrow \lambda_3$), либо от импульса к импульсу, а в пределах их группы [19]. Если к выходам ДИФП подключены радиоизлучатели, например, многолучевой ФАР, то устройство позволяет выполнять коммутацию пакетов на различные радиолучи, которые могут обслуживать различные подсети (VLANы [19]).



а. б.

Рисунок 6 – Предложенный принцип построения ступенчатой световодной гребенки: а) общий вид (сбоку) и б) пример ступенчато-скошенной сборки первой ступени, состоящей из трех двухслойных ярусов световодов (световодных торцов). Скошенность торцов обеспечивает их квазипараллельность к фронтам стоячей волны. Сдвиг на первой ступеньке d_1 соответствует резонансу с λ_1 (представлен для наглядности не в масштабе). Угол скошенности зависит от расположения торца данного световода на гребенке, т.е. от удаленности его от оси устройства;

$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$

Данное устройство авторы относят к классу волоконно-оптических многопортовых и одновременно – быстрых оптических переключателей ввиду того, что вариация $C_\lambda(t)$, например, в волоконно-оптическом сегменте RoF, может выполняться изменением мощности импульса в световодном элементе с повышенной нелинейностью, что реализуется аналоговыми средствами за времена ~ 0,01 нс и даже быстрее [18]. Количество выходных портов зависит от размера смесителя и структуры выходного зеркала ДИФП, и может составлять порядка 50…100 и более. Описанный метод не требует буферизации, и это также добавляет ему привлекательности. Но в отличие от решений Ultrafast All-Optical Switching [12-16], представленная схема призвана коммутировать сигналы традиционных многофотонных ВОС, работающих по G.703.

Выводы

Анализ известных волоконно-оптических коммутационных устройств показал, что имеет место определенный пробел в отношении коммутаторов оптических сигналов/пакетов, предназначенных для применения в традиционных ВОС (работающих с сигналами по G.703). Применение же коммерчески доступных моделей,

ориентированных на xWDM (по G.694) для построения оптических пакетных сетей не представляется коммерчески обоснованным ввиду получающейся низкой загрузки λ-канала в таком режиме. Поэтому реальное практическое применение OBS характеризуется существенно меньшим масштабом в сравнении с востребованностью данной технологии в настоящее время. Именно в рамках этого обстоятельства прорабатывается вопрос об использовании внутриполосной маркировки радиочастотного канала [2] (в RoF, по сути – в оптическом домене)), обеспечивающий параллельную обработку битов с такой λ-меткой, и как следствие – низкую задержку наряду с минимальным задействованием телекоммуникационных ресурсов при управлении «на оптическом уровне» [2], а также создание технологии дробного лямбда-переключения (FλS) [27 – 29]. Все это может успешно функционировать при наличии узкоспектральных разделителей, конструктивно основанных на применении высокоизбирательных средств, один из вариантов которых и представлен в настоящей статье.

В основу разрабатываемого многопортового волоконно-оптического переключателя/разделителя положен двухрезонаторный интерферометр Фабри-Перо с профилированным градиентным смесителем и гребенчатой структурой выходного зеркала. Последняя обеспечивает выделение (перенаправление) сигнальной компоненты с заданной λ-меткой из общего потока в определенный волоконно-оптический сегмент. Предложена конструкция указанной гребенки и выполнена количественная оценка ее основных параметров исходя из компьютерного результата моделирования электрической составляющей поля (интерференционной картины) в смесителе.

Устройство является однопролетным и многопортовым, с разрешающей способностью выше, чем у дисперсионных аналогов (работа которых основана на применении призмоподобных структур), и вполне подходит для сетей с FλS.

Кроме того, градиентный характер показателя преломления может быть дополнен дисперсионными свойствами материала смесителя, что позволит усилить различие в формировании интерференционных максимумов на разных длинах волн.

Работа выполнена в рамках конкурса лидерских проектов УГНТУ 2025 (№ В-17022).

Список литературы

1. Гольдштейн А. Б., Гольдштейн Б. С. Технология и протоколы MPLS.– СПб: БХВ-Петербург, 2005. –304 с.

2. Sahinel D., Rommel S., Monroy I. T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 221. https://doi.org/10.3390/app12010221.

3. Shafi M., Jha R. K. and Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 57548–57573. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385230.

4. Xuwei Xue, Shaojuan Zhang, Bingli Guo, Wei Ji, Rui Yin, Bin Chen, Shanguo Huang. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges // Computer Networks and Communications. 2023. Vol. 1. P. 272–291.

5. Zhao C., Cai Y., Liu A.; Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization // IEEE Trans. Wirel. Commun. 2020. Vol 19. P. 2382–2396.

6. Телекоммуникационный термин «Fronthaul» // Википедия: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]– URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fronthaul (дата обращения 01.07.2025).

7. Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial] //Journal of Optical Communications and Networking. 2023. Vol. 16. No 1. P. A1-A23.

8. Wang Miao, Jun Luo, Stefano Di Lucente, Harm Dorren, and Nicola Calabretta. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system // Optics Express. 2024. Vol. 22. No. 3. P. 2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465.

9. Mukherjee B. Optical Communication Networks. – Mc.Graw-Hill. 2005. –576 p.

10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review // Journal of Optics. 2018. Vol. 47. P. 307–317. DOI:10.1007/s12596-018-0452-3.

11. Основы технологии DWDM // Компания Т8 [Электронный ресурс]. – URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrarx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 01.07.2025).

12. Zhao Y. et al. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides //Optics

express. 2015. Vol. 23. No. 7. P. 9211-9220. DOI:10.1364/OE.23.009211.

13. Chai Z. et al. Ultrafast all-optical switching //Advanced Optical Materials. 2017. Vol. 5. No 7. P. 1600665. DOI: 10.1002/adom.201600665.

14. Ono M. et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 37–43.

15. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 4–6.

16. Rehman A. U. et al. A novel design of optical switch based on guided mode resonances in dielectric photonic crystal structures // Photonics. 2022. Vol. 9. No. 8. P. 580. https://doi.org/10.3390/photonics9080580.

17. Султанов А. Х., Виноградова И. Л., Мешков И. К., Андрианова А. В., Абдрахманова Г. И., Ишмияров А. А., Янтилина Л. З. Способ подключения антенных излучателей для RoF с применением оптического устройства и методика расчёта его параметров // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 5. С. 728–737. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737.

18. Agrawal G. P. Nonlinear fiber optics. – Boston: Academic Press, 2009. –466 p.

19. Vinogradova I. L., Golovina E. U., Gizatulin A. R., Meshkov I. K., Filatov P. E., Komissarov A. M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses // In Optical Technologies for Telecommunications. 2023. Vol. 13168. P. 51–62.

20. Виноградова И. Л. Характеристики двухрезонатороного интерферометра Фабри-Перо // Радиотехника. 2002. № 6. С. 33–39.

21. Абдрахманова Г. И., Андрианова А. В., Виноградова И. Л., Грахова Е. П., Зайнуллин А. Р., Ишмияров А. А., Мешков И. К., Султанов А. Х., Чириков Р. Ю. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов // Патент на полезную модель RUS 163995 U1. Опубл. 20.08.2016.

22. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры в измерительной технике – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

23. Андрианова А. В., Виноградова И. Л., Султанов А. Х, Мешков И. К., Абдрахманова Г. И, Грахова Е. П., Ишмияров А. А, Янтилина Л. З. Подход к получению 3D-наноструктурного двухфазного ситаллового стекла, основанный на интенсивном кручении под высоким давлением // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 489-500. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500.

24. Карпенко Г. Д., Клименко А. И. Способ динамической компенсеции дрейфа постоянной составляющей низкочастотного синусоидального сигнала. Патент SU 482686, A1, опубл. 30.08.1975, бюл.№32.

25. Kudinova M. et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses // APL Photonics. 2021. Vol. 6. No. 2. https://doi.org/10.1063/5.0028195.

26. Khonina S. N.; Kazanskiy N. L.; Butt M. A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review // Micromachines. 2024. Vol. 15. No. 11. P. 1321. https://doi.org/10.3390/mi15111321.

27. Baldi M., Ofek Y. Realizing Dynamic Optical Networking // Optical Networks Magazine, Special Issue «Dynamic Optical Networking: around the Corner or Light Years Away?». 2023. Vol. 4. No. 5. P. 100–111.

28. Agrawal D. et al. A scalable approach for supporting streaming media: Design, implementation and experiments//12th IEEE Symposium on Computers and Communications. IEEE, 2007. P. 211-217. DOI: 10.1109/ISCC.2007.4381589.

29. Baldi M., Ofek Y. Fractional lambda switching principles of operation and performance issues // Simulation. 2004. Vol. 80. No. 10. P. 527–544.

References

1. Goldstein A. B., Goldstein B. S. MPLS Technology and Protocols. SPb.: BHV– St. Petersburg, 2005. 304 p.

2. Sahinel D., Rommel S., Monroy I. T. Resource Management in Converged Optical and Millimeter Wave Radio Networks: A Review. Applied Sciences, 2022, vol. 12, no. 1 p. 221. https://doi.org/10.3390/app12010221.

3. Shafi M., Jha R. K. and Jain S. 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 57548–57573. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3385230.

4. Xuwei Xue, Shaojuan Zhang, Bingli Guo, Wei Ji , Rui Yin, Bin Chen, Shanguo Huang. Optical Switching Data Center Networks: Understanding Techniques and Challenges. Computer Networks and Communications, 2023, vol. 1,

pp. 272–291.

5. Zhao C., Cai Y., Liu A.; Zhao M., Hanzo L. Mobile Edge Computing Meets mmWave Communications: Joint Beamforming and Resource Allocation for System Delay Minimization. IEEE Trans. Wirel. Commun,2020, vol 19, pp. 2382–2396.

6. Telekommunikatsionnyy termin «Fronthaul». Wikipedia: the free encyclopedia [Electronic resource]. Available at : https://en.wikipedia.org/wiki/Fronthaul (accessed 01 July 2025).

7. Sato K. Optical switching will innovate intra data center networks [Invited Tutorial]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, vol. 16, no 1, pp. A1-A23.

8. Wang Miao, Jun Luo, Stefano Di Lucente, Harm Dorren, and Nicola Calabretta. Novel flat datacenter network architecture based on scalable and flow-controlled optical switch system. Optics Express, 2024, vol. 22, no. 3, pp. 2465–2472. DOI:10.1364/OE.22.002465.

9. Mukherjee B. Optical Communication Networks. Mc.Graw-Hill. 2005. 576 p.

10. Sasikala V., Chitra K. All optical switching and associated technologies: a review. Journal of Optics, 2018, vol. 47, pp. 307–317. //doi.org/10.1007/s12596-018-0452-3.

11. Osnovy tekhnologii DWDM. T8 Company [Electronic resource]. Available at : https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrarx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (accessed 01 July 2025).

12. Zhao Y. et al. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides. Optics Express, 2015, vol. 23, no. 7, pp. 9211–9220. DOI:10.1364/OE.23.009211.

13. Chai Z. et al. Ultrafast All-Optical Switching. Advanced Optical Materials, 2017, vol. 5, no 7, p.1600665. DOI: 10.1002/adom.201600665.

14. Ono M. et al. Ultrafast and energy-efficient all-optical switching with graphene-loaded deep-subwavelength plasmonic waveguides, Nature Photonics, 2020, vol. 14, no 1, pp. 37–43.

15. Rutckaia V., Schilling J. Ultrafast low-energy all-optical switching. Nature Photonics, 2020, vol. 14, no 1, pp. 4–6.

16. Rehman A. U. et al. A Novel Design of Optical Switch Based on Guided Mode Resonances in Dielectric Photonic Crystal Structures. Photonics, 2022, vol. 9, no 8, p. 580. https://doi.org/10.3390/photonics9080580.

17. Sultanov A. Kh., Vinogradova I. L., Meshkov I. K., Andrianova A. V., Abdrakhmanova G. I., Ishmiyarov A. A., Yantilina L. Z. Sposob podklyucheniya an-tennykh izluchateley dlya RoF s primeneniyem opticheskogo ustroystva i metodika raschota yego parametrov. Computer Optics, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 728–737. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-728-737.

18. Agrawal G. P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 2009, 466 p.

19. Vinogradova I. L., Golovina E. U., Gizatulin A. R., Meshkov I. K., Filatov P. E., Komissarov A. M. Method of RoF-network segment control using chirped optical pulses, In Optical Technologies for Telecommunications, 2023, vol. 13168, p. 51–62.

20. Vinogradova I. L. Kharakteristiki dvukhrezonatoronogo interferometra Fabri-Pero. Radio Engineering, 2002, no. 6, pp. 33–39 .

21. Abdrakhmanova G. I., Andrianova A. V., Vinogradova I. L., Grakhova E. P., Zainullin A. R., Ishmiyarov A. A., Meshkov I. K., Sultanov A. Kh., Chirikov R. Yu. Device for branching and chirping optical signals. Utility model patent, no. RU 163995 U1. Publish. 20.08.2016 (accessed 01 July 2025).

22. Skokov I. V. Mnogoluchevyye interferometry v izmeritel'noy tekhnike. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 256 p.

23. Andrianova A. V., Vinogradova I. L., Sultanov A. Kh., Meshkov I. K., Abdrakhmanova G. I., Grakhova E. P., Ishmiyarov A. A., Yantilina L. Z. Podkhod k polucheniyu 3D-nanostrukturnogo dvukhfaznogo sitallovogo stekla, osnovannyy na intensivnom kruchenii pod vysokim davleniyem. Computer Optics, 2016, vol. 40, no. 4, pp. 489-500. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-489-500.

24. Karpenko G. D., Klimenko A. I. Ability to dynamically compensate for the drift of a constant value of a low-frequency sinusoidal signal, patent no. SU 482686, A1. Publish. 30.08.1975(accessed 01 July 2025.

25. Kudinova M. et al. Two-step manufacturing of hundreds of meter-long silicon micrometer-size core optical fibers with less than 0.2 dB/cm background losses. APL Photonics, 2021, vol. 6 , no. 2. https://doi.org/10.1063/5.0028195.

26. Khonina S. N.; Kazanskiy N. L.; Butt M. A. Grayscale Lithography and a Brief Introduction to Other Widely Used Lithographic Methods: A State-of-the-Art Review. Micromachines, 2024, vol. 15, no. 11, p. 1321. https://doi.org/10.3390/mi15111321.

28. Baldi M., Ofek Y. Realizing Dynamic Optical Networking. Optical Networks Magazine, Special Issue «Dynamic

Optical Networking: around the Corner or Light Years Away?», 2023, vol. 4, no. 5, pp. 100–111.

29. Agrawal D. et al. A scalable approach for supporting streaming media: Design, implementation and experiments. 12th IEEE Symposium on Computers and Communication, IEEE, 2007, p. 211-217. DOI: 10.1109/ISCC.2007.4381589.