

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ КОММУТАТОРОВ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Султанов А.Х., Виноградова И.Л.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Аннотация

Настоящая статья посвящена исследованию возможности создания коммутаторов оптических сигналов, управляемых дополнительно подаваемым оптическим излучением. Предполагается, что управляющее излучение изменяет показатель преломления оптической среды устройства, а с ним и длину волны информационного излучения. Для контроля последней используется многолучевой интерферометр. Проведена краткая оценка технических аспектов построения устройства. Анализ показал, что интерференционный коммутатор принципиально технически реализуем. К основным его недостаткам можно отнести наличие постоянной составляющей в интерференционной картине и искажение действием интерференции и нелинейных оптических эффектов цифрового оптического сигнала.

Постановка задачи

Сегодня современную вычислительную технику, системы связи, управления и обработки сигналов невозможно представить без применения оптических технологий. Это с одной стороны является следствием стремительного развития волоконных и интегрально-оптических устройств, с другой стороны – продиктовано требованиями по увеличению информационной ёмкости канала, скорости обработки сообщений и показателей надёжности систем телекоммуникаций. Тем не менее, ещё достаточно широкий круг сетевых задач решается на базе электронных компонентов, что не только ограничивает быстродействие в целом, но в ряде случаев требует дополнительной инженерной проработки для обеспечения надёжности элементов системы. Последнее связано с внедрением систем передачи на промышленных предприятиях с повышенным уровнем воздействующих факторов, в том числе предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК), объектах специального назначения и т.д. – везде, где с одной стороны, как правило, производится значительное влияние электромагнитных помех (от работающих промышленных агрегатов, высоковольтных линий электропередач - ЛЭП), фоновых излучений, широкополосной вибрации, температурных флуктуаций и связанных с ними возмущений и т.д. А с другой стороны, к каждому элементу системы (активной преобразующей аппаратуре, узлам управления световых потоков на базе электрических или магнитных потенциалов, их электрическим блокам питания, электрическим проводам и разъёмам) предъявляются требования по обеспечению соответствующего уровня пожаровзрывобезопасности в соответствии с действующими стандартами [1] в зависимости от требований производства.

Новые технические задачи, поставленные промышленностью перед системами передачи и обработки сообщений по увеличению скорости, объемов передаваемой информации, расширению областей технических приложений, приводят к необходимости пересмотра фундаментальных подходов не только к проектированию, управлению и контролю

объектов систем телекоммуникаций, но и физических принципов построения их компонентов.

Перспективным является направление на создание полностью оптических транспортных сетей (АОН-сетей, [2]), в функционировании которых главную роль при мультиплексировании, перегруппировании и т.д. играют не электронные (оптоэлектронные), а полностью оптические технологии и компоненты. Необходимо заметить, что решение перспективных сетевых задач всё больше приводит к необходимости проектирования и создания разветвлённых архитектур, которые обладают как высокой надёжностью из-за значительного резервирования, так и способностью к адаптации в выполнении требований сетевых операторов и абонентов. В этой связи роль оптоволоконных компонентов и устройств управления различного назначения повышается.

Ведущие фирмы-производители телекоммуникационного оборудования предлагают образцы оптических компонентов управления световыми информационными потоками. Как правило, это WDM-мультиплексоры, волоконно-оптические усилители, фильтры, коммутаторы и т.д. Здесь следует провести разграничение между полностью оптическими АОН-компонентами и компонентами, в которых управление световым информационным потоком осуществляется действием электрических, магнитных потенциалов (электрооптические эффекты Керра, Поккельса, Фарадея [3] и т.д.). Например, работа WDM-мультиплексоров основана на дифракционном разделении световых волн разных длин [3], следовательно, эти устройства не требуют дополнительного использования электроники в отличие, например, от моделей переменных аттенуаторов. Последние предполагают регулирование затухания путём изменения величины воздушного зазора при помощи пьезоэлектрика или оптических изоляторов, использующих эффект магнитного вращения плоскости поляризации проходящей световой волны. Другой широко распространённый, по сути, ключевой элемент в технологии полностью оптических сетей – волоконно-оптический усилитель (световод, легированный эрбием – EDFA), используемый для усиления до уровня порядка 1 мВт слабого инфор-

мационного сигнала в третьем окне прозрачности [2] 1530...1560 нм при накачке мощным излучением (≈ 100 мВт) на более короткой длине волны. На сегодняшний день усилитель применяется в известной схеме включения [2], когда лазер накачки располагается в непосредственной близости от EDFA. Такой способ использования EDFA на оптоволоконной линии требует подведения электропитания для лазера накачки в зону усиления, что в ряде технических приложений приводит к существенному усложнению и удорожанию системы телекоммуникаций, тем самым практически сводя на нет достоинства новой технологии усиления – без использования электронных регенераторов. Размещение электронных узлов в условиях повышенного влияния воздействующих факторов, например, на ЛЭП, что является весьма распространённым случаем при строительстве волоконно-оптических линейных сооружений (ВОЛС) [4], представляет серьёзную инженерно-техническую задачу. С учётом выбора места крепления оптоволоконного кабеля к опорам ЛЭП в соответствии с эпюрой напряжений компоненты ВОЛС, тем не менее, находятся в зоне высокого электрического напряжения – не меньше 5 ... 10 кВ. Под действием такого поля при наличии проводимых специальных (защитных) инженерно-технических мероприятий в определённых пределах изменяют свойства даже полностью оптические компоненты [5], [6], и т.д., и уж тем более подвергаются воздействию поля электронные узлы управляющих устройств.

Следовательно, разработка новых подходов к конструированию и проведение математического моделирования перспективных оптических компонентов, предназначенных для использования в АОН-сетях (в том числе, для эксплуатации в нестандартных условиях) преимущественно без использования управляющих электронных сигналов – с переходом на оптическое управление, является актуальной технической задачей. Здесь следует отметить, что естественный путь совершенствования оптических компонентов, опирающийся на достижения в области технологии изготовления практически уже исчерпан. Например, в световодах из кварцевого стекла невозможно получить потери много меньше 0,1 дБ/км. Поэтому, наряду с совершенствованием применяемых технологий, необходимо искать принципиально новые подходы повышения эффективности, качества и выявления ранее неизвестных свойств оптических компонентов, в том числе за счет принципиального изменения свойств самого вещества.

Исследование возможности построения коммутатора с интерферометром Фабри-Перо

В настоящее время проводятся исследования в области создания полностью оптических компонентов ВОЛС, использующих управляющий оптический сигнал. Действие последнего сводится к изменению оптических свойств прозрачной среды устройства (эта область обычно называется смесителем, [2]), которые

влияют на условия распространения там оптического излучения, переносящего информационный сигнал, обычно имеющего другую центральную длину волны.

В рамках такой концепции большое внимание уделено разработке оптических ключей и коммутаторов, основанных на эффекте нелинейного двулучепреломления, [7], [8]. Основной принцип их работы можно сформулировать следующим образом. Информационное излучение (здесь и далее – переносящее информационный цифровой сигнал) подаётся в смеситель, выполненный из анизотропного материала, двулучепреломляющие свойства которого зависят от плотности вводимого оптического излучения – присутствия или отсутствия более интенсивного управляющего излучения. Подачей последнего можно менять условия преломления (прежде всего угол преломления) для информационного излучения, соответственно, перенаправлять его в пространстве. Если в области выходного торца (торцов) смесителя разместить выходные оптические световоды, координаты мест прикреплений которых соответствуют точкам прохождения информационного излучения при наличии и отсутствии управляющего сигнала, то такое оптическое устройство будет выполнять функцию оптического переключателя каналов. Безусловно, подобные коммутаторы обладают хорошими техническими показателями (надёжностью, помехоустойчивостью, скоростью переключения, сроком службы и т.д.) и найдут широкое применение в АОН-сетях. Но представленные компоненты обладают и недостатками. Во-первых, очевидно, что такие устройства являются весьма чувствительными к состоянию поляризации как информационного, так и управляющего излучений, [2, 3, 7, 9 и др.]. Это накладывает ограничения на применяемые волокна или приводит к требованию дополнительного использования оптического поляризатора на входе устройства, снижающего динамический диапазон сигнала. Во-вторых, для того, что бы разделить в пространстве смесителя световые информационные пучки прежде, чем они попадут в выходные световоды, требуется немалое (относительно диаметра световода) расстояние – порядка нескольких десятков и даже сотен микрометров, [2, 10]. Это не только увеличивает поперечные размеры смесителя, разумеется, вместе с изменением модового состава информационного излучения (что увеличивает дисперсию в сигнале, снижает допустимую битовую скорость передачи и т.д.), но и снижает помехоустойчивость устройства влиянию вибрации, действию значительных электрических потенциалов. Последние, прежде всего, действуют на двулучепреломляющие оптические свойства, [5, 6].

Вообще говоря, идея об использовании многолучевого интерференционного компонента, выполняющего функцию фильтра [7, 11, 12, 13] в системах цифровых телекоммуникаций с учётом вносимых им искажений в цифровой сигнал [14] в данном случае не является пионерской, а лишь развитием ранее полученных результатов.

С целью изучения возможности создания полностью оптических коммутаторов, решающих аналогичную техническую задачу, предлагается использовать

физический эффект нелинейной зависимости показателя преломления изотропной прозрачной среды n (без привлечения анизотропии, двулучепреломления, и т.д.) от интенсивности входного оптического излучения. Изменение значения n в области смесителя действием управляющего излучения приведёт к изменению длины волны информационного излучения [3]. Если смеситель помещён в интерферометр, то присутствие или отсутствие управляющего излучения будет оказывать влияние на результирующую интерференционную картину или выходной сигнал интерферометра. Если такое нелинейное устройство предназначено для выполнения функции ключа, пропускающего информационный сигнал в отсутствие управляющего и отражающего информационный сигнал обратно при наличии управляющего излучения, то на входном световодном канале (перед входом в устройство) следует разместить оптический изолятор – для предотвращения попадания отражённого информационного излучения к лазеру и другим компонентам. В отношении выбора типа интерферометра предпочтительным является использование многолучевого интерферометра Фабри-Перо (ИФП) [2] в сравнении с двухлучевыми интерференционными устройствами: Маха-Цендера, Майкельсона и т.д. Объяснением может служить как более высокая чувствительность ИФП (прежде всего из-за большого количества интерферирующих лучей), так и помехоустойчивость, что связано с влиянием воздействующего фактора сразу на все лучи, а не на какой-либо один из каналов. Так интерференционный ключ пропускает информационное излучение в отсутствие управляющего сигнала (в области выходного зеркала ИФП имеет место максимум стоячей волны) и отражает информационное излучение при наличии управляющего сигнала, рис. 1.

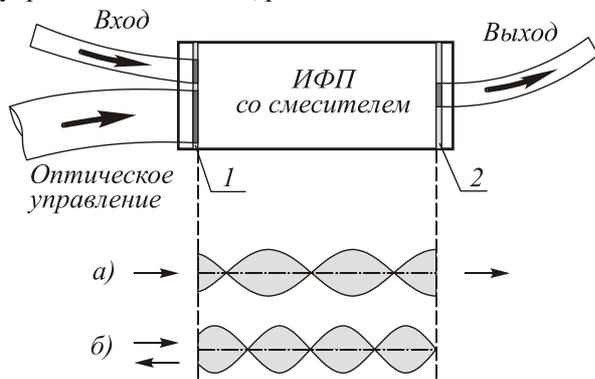


Рис. 1. Иллюстрация принципа действия интерференционного ключа:

- а) информационное излучение проходит в выходной световодный канал,
 - б) информационное излучение отражается.
- На рисунке обозначено:
1 – входное зеркало ИФП, 2 – выходное зеркало

Не менее интересным представляется построение переключателя оптических каналов с использованием данного эффекта. Принцип работы интерференционного коммутатора также основан на том, что изменением значения n можно в окрестности одной и той же пространственной координаты чередовать

положение максимумов и минимумов стоячей световой волны, имеющей место в резонаторе Фабри-Перо. Если подбором технических параметров интерферометра обеспечить одновременное выполнение двух условий для информационного излучения: 1) максимум стоячей волны находится в области одного из выходных световодных каналов, и 2) минимум стоячей волны находится в области второго выходного световодного канала, то информационное излучение будет подаваться в первый выходной канал, рис. 2. С взаимозаменяемой положений минимумов и максимумов стоячей волны (действием управляющего излучения) произойдёт переключение оптических каналов.

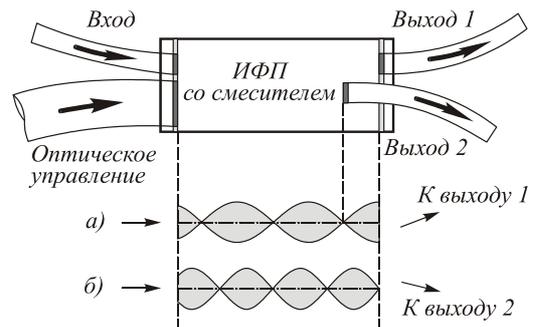


Рис. 2. Иллюстрация принципа действия интерференционного коммутатора:

- а) информационное излучение проходит в первый выходной световодный канал,
- б) информационное излучение проходит во второй выходной канал

Технические аспекты реализации интерференционных коммутаторов

За привлекательной стороной полностью оптических интерференционных коммутаторов, состоящей как в независимости их работоспособности от состояния поляризации входного излучения, так и в возможности обеспечения малых габаритов устройства, кроется немало сложностей при проработке инженерной концепции к их созданию.

К методологическим сложностям следует отнести наличие постоянной составляющей в интерференционной картине ИФП, что приведёт к аддитивному шуму в смежном канале и снижению динамического диапазона цифрового сигнала, подаваемого в подключаемый канал, а также искажения фронтов импульсов действием интерференции – из-за chirp-эффекта, свойственного полупроводниковому лазеру, [14, 15]. Не менее значимыми могут оказаться конструкторско-технологические проблемы, стоящие на пути к созданию интерференционных коммутаторов. К ним следует отнести способ изготовления смесителя, обеспечивающего различное расположение торцов выходных световодов относительно входного торца, рис. 2, с учётом требования о минимизации его размеров. Последнее связано с желанием использовать приемлемые мощности управляющего излучения (составляющие порядка 1 Вт с целью снижения негативного влияния нелинейных оптических эффектов как в подводящем его световоде, так и в смесите-

ле) с одновременным эффективным смещением показателя преломления смесителя, т.е. получением в смесителе высоких оптических интенсивностей. В этой связи будет актуальным вопрос минимизации паразитных нелинейных эффектов непосредственно в области смесителя, где необходимо реализовать высокую плотность оптического излучения для эффективного изменения n .

Далее представлен краткий анализ перечисленных технических проблем и намечены пути к их решению.

В отношении постоянной составляющей интерференционной картины Фабри-Перо можно сказать, что её значение существенно зависит от коэффициентов отражения зеркал ρ , рис. 3. С увеличением ρ до значений 0,8 и выше постоянная составляющая остаётся меньше 10% от амплитуды максимума, [2, 14].

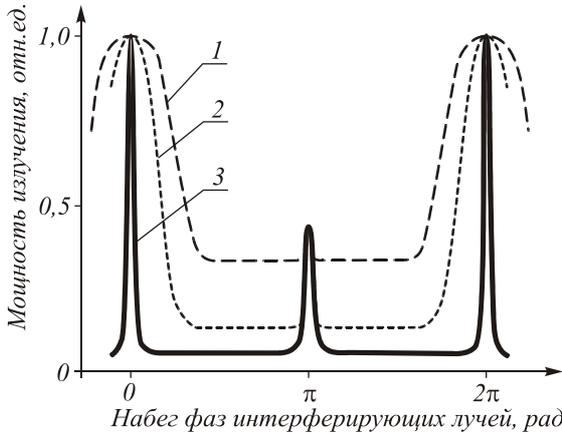


Рис. 3. Иллюстрация зависимости передаточной функции многолучевого интерферометра от набега фаз interfering beams для различных значений ρ :
 1 – $\rho_{\text{ИФП}} = 0,6$; 2 – $\rho_{\text{ИФП}} = 0,8$;
 3 – двухрезонаторный многолучевой интерферометр с коэффициентом отражения – $\rho_{\text{ДИФП}} = 0,8$. [13]

Ещё более значительного снижения постоянной составляющей и повышения контрастности интерференционной картины можно добиться путём применением двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо (ДИФП) [16], который представляет собой ИФП с волоконной обратной связью, рис. 4. Действие второго резонансного контура приводит к увеличению контрастности в интерференционной картине в сравнении с ИФП при том же значении коэффициента отражения зеркал, и к появлению дополнительного резонанса на периоде передаточной функции.

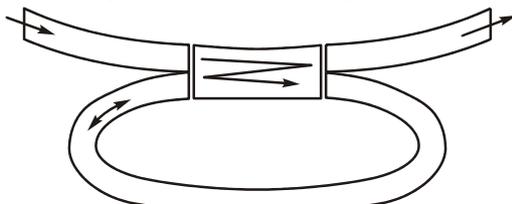


Рис. 4. Оптоволоконная схема двухрезонаторного многолучевого интерферометра

Так, для ДИФП с $\rho=0,8$ значение постоянной составляющей не превосходит 6...7%. Если устройство

предназначено для коммутации каналов с мощностью 0,5 мВт [17], то аддитивный шум в смежном канале, связанный с рассматриваемым интерференционным эффектом, составит порядок 30...40 мкВт, что является допустимым для системы передачи данных в соответствии с [17, 18]. Уменьшение уровня мощности выходного информационного сигнала, прошедшего интерференционный коммутатор, может быть компенсировано волоконно-оптическим усилителем [2].

В отношении эффекта изменения длины волны волны полупроводникового лазера (chip-эффекта) при модуляции его тока накачки $I(t)$ будут иметь место искажения формы импульсного сигнала, рис. 5. Однако в [12] показано, что искажения относятся только к фронтам импульсов и зависят от параметров интерферометра.

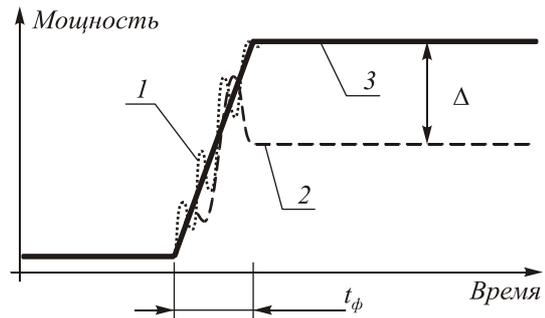


Рис. 5. Иллюстрация искажений формы цифрового импульса действием многолучевой интерференции. На рисунке обозначено: t_ϕ – длительность фронта реального трапециoidalного импульса, 1 и 2 – искажённые импульсы, 1 – интерферометр к моменту окончания t_ϕ остался в районе прежней рабочей точки, 2 – положение рабочей точки интерферометра изменилось, появилась отражённая волна с амплитудой Δ ; 3 – неискажённый импульс

Если длина волны излучения лазера меняется по закону [15]:

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\partial \lambda}{\partial I} \cdot I(t) = \lambda_0 + \Delta \lambda, \quad (1)$$

и $\Delta \lambda$ не превосходит 0,1...0,5% от λ_0 , что имеет место для большинства современных полупроводниковых лазеров, то изменение результирующего набега фаз лучей в интерферометре Фабри-Перо:

$$\delta(\lambda) = \frac{4\pi nh}{\lambda},$$

$$|\Delta \delta(\Delta \lambda)| = \frac{4\pi nh}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda = \delta \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}, \quad (2)$$

где h – база ИФП (расстояние между зеркалами), также останется меньше 1% от периода, т.е. не превысит 0,06 рад. Для ИФП с $\rho \approx 0,8$ или ДИФП с $\rho \approx 0,7...0,8$ передача как цифрового импульса, так и паузы будет соответствовать требуемой рабочей точке интерферометра. На качество приёма искажённые фронты влияния практически не окажут как в связи с применением помехоустойчивых методов обработки сигнала в приёмнике, так и по причине использования в современных сетевых приёмниках устройств срабатывания, принимающих решение по

факту превышения энергии (а не мощности) принятого сигнала (импульса) над установленным пороговым значением, [19]. Искажённые фронты приводят к перераспределению поступающей энергии во времени, но не к её изменению при условии малого влияния $\Delta\lambda$ на $\delta(\lambda)$, что в данных устройствах является обязательным.

Оценим характерный радиус смесителя, представляющего собой область резонатора Фабри-Перо (по рис. 1 и 2). Коэффициент преломления n , зависящий от интенсивности управляющего излучения $I_{упр}$, можно представить [8]:

$$n = n_0 + \hat{n} \cdot 2I_{упр} \cdot \bar{Z}, \quad (3)$$

где \hat{n} – нелинейная составляющая показателя преломления, в зависимости от свойств среды может быть как положительной, так и отрицательной величиной; для кварцевых стекол положительна и приблизительно равна $10^{-15} \text{ м}^2/\text{В}^2$ и имеет слабую зависимость от частоты света ω в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне; \bar{Z} – волновое сопротивление среды (направляющей структуры).

Пусть в отсутствии управляющего излучения ИФП настроен на максимум пропускания информационного излучения с длиной волны λ (для наглядности оценки рассматривается интерференционный ключ). Подача управляющего излучения изменяет показатель преломления, и рабочая точка ИФП смещается по его передаточной характеристике, рис. 6. Обозначим для первого случая разность хода лучей δ_1 , для второго – δ_2 . Тогда с учётом выражения для передаточной функции ИФП для интенсивности информационного сигнала на выходе $I_{инф}^{вых}$ относительно её входного значения $I_{инф}^{ex}$ справедливо следующее [2]:

$$I_{инф,1}^{вых} = I_{инф}^{вых}(\delta_1) = 1 \cdot I_{инф}^{ex} = I_{инф}^{ex}$$

и

$$I_{инф,2}^{вых} = I_{инф}^{вых}(\delta_2) = \frac{I_{инф}^{ex}}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)}. \quad (4)$$

С учётом того, что передаточная функция ИФП имеет постоянную составляющую, согласно [2] равно:

$$I_{инф,min}^{вых} = I_{инф}^{ex} \cdot \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2, \quad (5)$$

и, кроме того, реализуемое технически наименьшее значение может превосходить $I_{инф,min}^{вых}$ в α раз, то

для $I_{инф,2}^{вых}$ можно записать:

$$\frac{I_{инф}^{вых}(\delta_2)}{I_{инф}^{ex}} = \frac{1}{1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\delta_2}{2}\right)} = \alpha \cdot \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2. \quad (6)$$

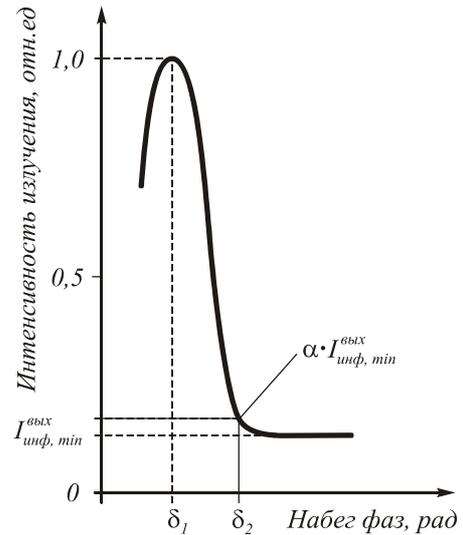


Рис. 6. Иллюстрация смещения рабочей точки ИФП при изменении δ

Из (6) получаем соотношение для $\delta_2/2$:

$$\frac{\delta_2}{2} = \arcsin \sqrt{S},$$

$$S = \left(\frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{1+\rho}{1-\rho} \right)^2 - 1 \right) \cdot \frac{(1-\rho)^2}{4\rho}. \quad (7)$$

Заметим, что $\Delta\delta(\Delta n) = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \Delta n$ и $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$, с

учётом (7) запишем:

$$\frac{2\pi h}{\lambda} \cdot \Delta n = \arcsin \sqrt{S} = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \hat{n} \cdot \bar{Z} \cdot \frac{P}{\pi r^2}, \quad (8)$$

где r – искомый радиус смесителя, P – мощность (в Вт) управляющего излучения, подаваемого в смеситель для смещения рабочей точки ИФП. Выражение (8) представляет собой соотношение между конструктивными параметрами устройства: длиной h и радиусом r смесителя, и мощностью управляющего излучения P .

Произведём численную оценку радиуса смесителя для наиболее типичных конструктивных параметров волоконного ИФП, [11, 12]: $h \approx 0,1$ мм – при необходимости выполнения смесителя с меньшей длиной стоимость его изготовления будет существенно увеличиваться; для смесителя с длиной, превосходящей 0,1 мм, начнётся заметное негативное влияние конечной когерентности излучения, приводящей к размытию интерференционной картины. Пусть длина волны управляющего излучения составляет 980 нм. Этот выбор обусловлен широким парком мощных полупроводниковых лазеров, обладающих различными эксплуатационно-техническими параметрами, серийно изготавливаемых в России и за рубежом и используемых для накачки световода EDFA [20]. Волновое сопротивление излучению среды смесителя для состоятельности оценки возьмём равным $120 \cdot \pi$ Ом. Тогда для $\rho=0,8$ получаем: $S=0,90795$, и далее для мощности управляющего сигнала в пределах 0,5...1 Вт получаем, что средний радиус смесителя должен составлять 10...24 мкм.

Поясним, что понимается под «средним» радиусом смесителя. Желание снизить влияние межмодовой дисперсии с учётом значительной длины оптического пути в ИФП из-за переотражений (тем более в ДИФП) приводит к необходимости исполнять направляющую структуру такой, которая поддерживала бы единственную поперечную моду. С этой точки зрения диаметр смесителя не должен превосходить 10 мкм. С другой стороны, такой малый диаметр смесителя затрудняет монтаж многомодового или нескольких одномодовых световодов стандартного диаметра в области его входных и выходных торцов. Для обеспечения как удобства технической реализации устройства с выполнением требования одно- или маломодового режима возбуждения мод в нём, а также для снижения мощности управляющего излучения предлагается смеситель выполнять в форме тела вращения с зауженной средней частью, рис. 7, по аналогии с [11, 12].

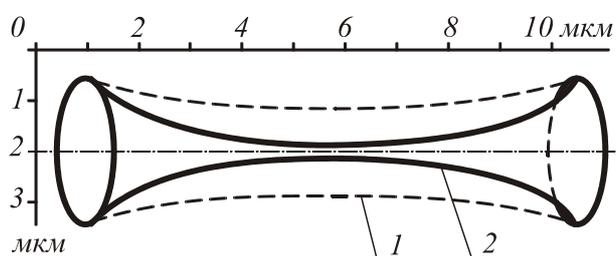


Рис. 7. Примерный вид смесителя, представляющего собой область резонатора Фабри-Перо.

Кривые 1 и 2 характеризуют различные виды профиля в зависимости от требуемого наименьшего радиуса:

- 1 – направляющая структура многомодовая,
- 2 – одномодовая

Далее остановимся на таком техническом аспекте, как повышенное влияние паразитных нелинейных оптических эффектов в смесителе, принимая во внимание его зауженную часть. Наиболее значимым эффектом, имеющим место в оптических кварцевых материалах, является вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ), представляющего собой рассеяние падающей световой волны (в данном случае как информационного, так и управляющего излучений) на гиперзвуковой волне, появляющейся в материале под действием падающего света – из-за эффекта электрострикции [8]. Так как кварц – электрострикционный материал, то ВРМБ является наиболее значимым эффектом и, вообще говоря, уже начинает заметно проявляться на интенсивностях, необходимых для создания требуемого нелинейного режима преломления в смесителе [21]. Тем не менее, проводимые в настоящее время работы, направленные на исследование оптических свойств прозрачного кварца в нанокристаллическом состоянии [22, 23 и др.], показали, что наноструктурный кварц обладает пониженным действием ВРМБ из-за его повышенной твёрдости и одновременно пластичности, что вообще присуще наноструктурным материалам [24, 25], а в данном случае оказывает

демпфирующее действие на гиперзвуковую волну. В этой связи исполнение смесителя из такого материала, что пока представляет собой дорогостоящее мероприятие, позволит уменьшить действие ВРМБ и реализовать требуемый нелинейный режим преломления. Другие базовые нелинейные эффекты [8], как нелинейное затухание (из-за многофотонного поглощения), модуляционная неустойчивость и параметрическая генерация гармоник, во-первых, проявляются чрезвычайно слабо [21, 26, 27], во-вторых, относительно несложно устраняются техническими мероприятиями. Под последними можно понимать соответствующий выбор длин волн управляющего и информационного излучений, снижение анизотропии в смесителе, что как раз характерно наноструктурным материалам из-за повышенной измельченности и однородности кристаллита, и так далее. Следовательно, снижение влияния паразитных нелинейных эффектов на передаваемый цифровой сигнал можно обеспечить уменьшением мощности сигнала управления, подбором технических характеристик интерференционного коммутатора и применением нанокристаллического кварца при его изготовлении.

С целью как минимизации конструкции устройства, так и влияния паразитных нелинейных оптических эффектов в подводящем канале – из-за уменьшения требуемой мощности управления, смеситель может быть выполнен с ещё меньшими размерами в сравнении с представленными на рис. 7.

Согласно рис. 8 и 9, смеситель может быть выполнен с малыми размерами, составляющими порядок диаметров одномодовых световодов, следовательно, технические параметры интерференционного коммутатора можно подбирать в достаточно широких пределах в зависимости от решаемой телекоммуникационной задачи.

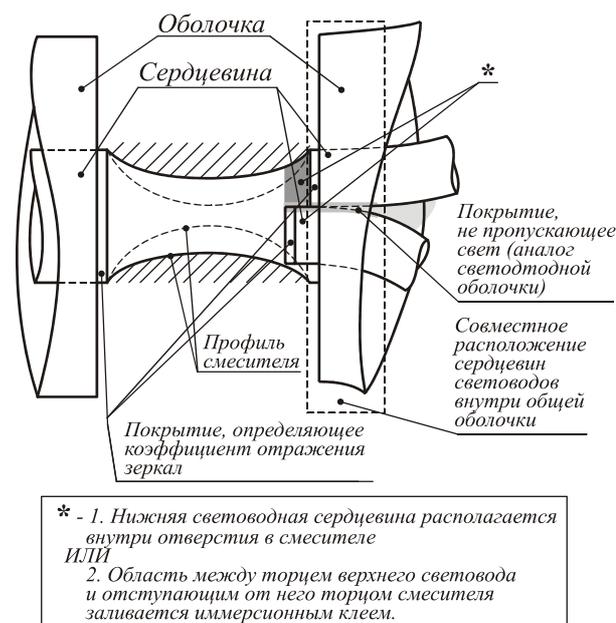


Рис. 8а Подход к реализации конструкции интерференционного коммутатора

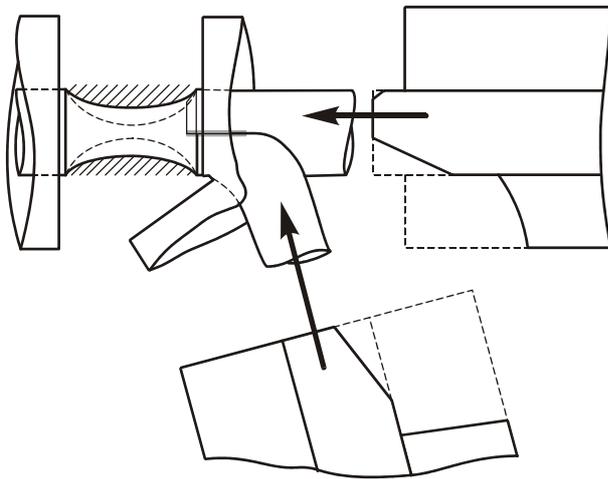


Рис. 8б. Подход к огранке торцов выходных световодных каналов

Торец широкого световода, к которому приклеивается профиль смесителя

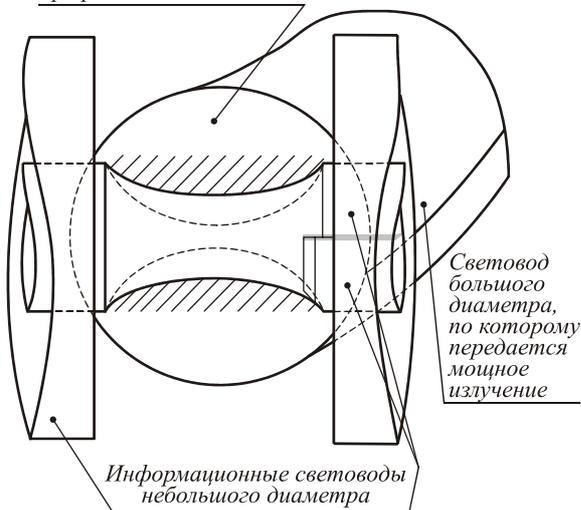


Рис. 9. Подход к реализации способа подведения мощного управляющего излучения к смесителю независимо от цифрового информационного канала

Перспективные направления исследований на пути создания интерференционных коммутаторов

Необходимо заметить, что проведённая оценка основных технических параметров интерференционного переключающего устройства в соответствии с выражениями (7), (8), иллюстрирующая перемещение рабочей точки интерферометра, рис. 6, справедлива при действии следующих базовых предположений:

1) технические параметры ИФП изменяются со временем значительно медленнее, чем характерная длительность импульса в системе передачи. Или по-другому – интерферометр имеет постоянные технические параметры в сравнении с характерными временами изменения параметров входного сигнала;

2) интерференционная картина в ИФП соответствует случаю, представленному в [2], т.е. интерферометр имеет плоские бесконечно длинные зеркала, а область между ними не обладает какими-либо

свойствами направляющей структуры. Иными словами, излучение отражается только от зеркал ИФП, но не от профиля, расположенного между ними.

Скорость изменения показателя преломления в области интерферометра характеризуется временем «перестройки» оптической среды τ_n и зависит от быстроты изменения параметров движения оптических электронов, (расположенных на внешних энергетических уровнях). Нелинейный режим преломления связан с процессом переизлучения фотонов электронами, иными словами – с формой зависимости поляризации вещества от электрической напряжённости падающего светового поля [8, 28]. Если говорить о протяжённой структуре вещества (световоде), то оптические эффекты начинают проявляться в «установившемся режиме» после прохождения излучением длины X , зависящей от интенсивности входного сигнала и плотности прозрачного вещества. Расстояние X (отмеряемое, например, от входного торца структуры) определяется тем условием, что всё распространяющееся далее излучение получено уже от «вторичных» по Гюйгенсу [29] источников и не содержит ни одного фотона, изначально вошедшего в среду. Для кварцевых стёкол и реальных интенсивностей излучения, используемых в телекоммуникациях и информационно-измерительных системах, величина X незначительна и не превосходит нескольких микрон [8, 9]. Следовательно, время перестройки оптической среды составит порядок $\tau_n \approx X \cdot n/c \approx 10^{-13} \dots 10^{-14}$ с, где c – скорость света в вакууме. Это время гораздо меньше такта в цифровых системах передачи, длительность которого для синхронной сети уровня STM-256 составляет около 10^{-10} с. Но время τ_n сравнимо с временем «нахождения» излучения в интерферометре τ_n , которое может быть оценено через эффективную длину оптического пути в ИФП с учётом эффективного количества переотражений и скорости света в оптической среде:

$$\tau_n \approx \frac{\sqrt{\rho}}{1-\rho} \cdot h \cdot \frac{n}{c}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения рассматриваемого ИФП, получаем, что $\tau_n \approx 10^{-13} \dots 10^{-14}$ с. Иными словами, в момент подачи управляющего излучения в ИФП его передаточная функция, вообще говоря, не будет соответствовать известной, приведённой в [2]. Аналогичная проблема, связанная с моделированием процесса работы ИФП в случае быстрого изменения его параметров, затрагивалась в [30] при разработке подходов к созданию полностью оптических бистабильных устройств. Применительно к рассматриваемой задаче следует отметить, что изучение процесса, происходящего в момент подачи управляющего излучения в ИФП, является предметом дальнейших технических исследований. Тем не менее, если выставить требование по непрерывности управляющего излучения и согласиться с незначительной возможной потерей информации (напри-

мер, 1 бита), то процесс работы интерференционного коммутатора может быть описан на базе известной математической модели ИФП [2].

В отношении зависимости передаточной функции ИФП от наличия профиля направляющей структуры между его зеркалами следует говорить о необходимости математического моделирования пространственной интерференционной картины (формы стоячей волны в резонаторе) с учётом лучей, отражённых от направляющего профиля, рис. 10.

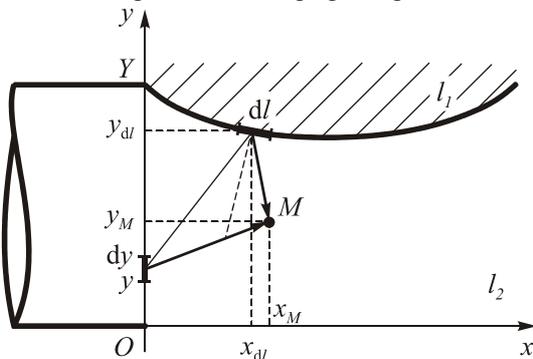


Рис. 10. Иллюстрация лучевого подхода к получению пространственной интерференционной картины в ИФП с учётом направляющей структуры между его зеркалами. Кривая l_2 не показана

Предполагается, что в произвольной точке М складываются лучи, идущие от торца, а также отражённые от верхнего и нижнего (не показан) профилей смесителя, характеризующихся кривыми l_1 и l_2 . Если на профиль смесителя нанесено отражающее покрытие, то роль этих лучей ещё усиливается. Так, каждое слагаемое ряда, характеризующего складывающиеся лучи в ИФП [2], будет состоять из четырёх частей: кроме отражения от зеркал добавятся ещё лучи, отражённые от нижнего и верхнего профилей. Именно таким методом была получена передаточная функция ДИФП [16].

Кроме лучевого метода задачу о моделировании пространственной интерференционной картины в сложном резонаторе можно решить с использованием волнового подхода – путём решения уравнения Шредингера в заданной направляющей структуре. Подобный подход был успешно применён при исследовании процесса передачи излучения по оптоволоконной системе, составленной из волокон с различными техническими характеристиками, [31]. В любом случае, после проведения указанного моделирования представляется целесообразным выполнить оптимизацию формы смесителя с учётом возможного отражающего покрытия, нанесённого на вогнутый профиль, и далее произвести конструкторско-технологическую проработку устройства интерференционного коммутатора и оснастки для его изготовления.

Выводы

Таким образом, в результате исследования возможности построения коммутаторов оптических сигналов, управляемых оптическим излучением,

выявлено следующее. Представляется технически реализуемым построение таких устройств с использованием эффекта нелинейной зависимости показателя преломления оптической среды от интенсивности управляющего излучения. Причём для контроля результирующей длины волны излучения в среде предлагается использовать многолучевой интерферометр – ввиду его высокой чувствительности к изменению фазового набегу лучей.

Подобное устройство, равно как и аналогичные, обладает соответствующими достоинствами и недостатками. К достоинствам следует отнести высокую скорость переключения, независимость работоспособности от состояния поляризации излучения, малогабаритность конструкции, в которой соответствующим подбором технических параметров можно исключить какое-либо преобразование мод излучения (направляющая структура везде может оставаться одномодовой). Среди недостатков наиболее значимыми являются наличие постоянной составляющей в интерференционной картине, высокая трудоёмкость изготовления устройства и искажение действием нелинейных оптических эффектов и интерференции передаваемого цифрового сигнала. Тем не менее, предварительная оценка показала наличие возможности частичной компенсации недостатков устройства путём применения ряда инженерно-технических мероприятий.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. Шестое издание с изм. и доп., принятыми Главгосэнергонадзором РФ. – С.-Петербург: изд-во «Деан», 2000. – 926 с.
2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети // М.: Издательство Эко-Трендз, 2000. – 267с.
3. Матвеев А.Н. Оптика: Учеб.пособие для физ.спец. вузов // М.: Высшая школа, 1985.- 351 с.
4. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л., Алькин Ю.П. Реконструкция ведомственной сети ОАО «Башкирэнерго» // ВКСС, - 2002. № 3. С. 60-69.
5. Бурдин В.А., Головина О.П., Платонов А.А. Стойкость оптических волокон к действию электрических разрядов // Тез. докл. Российской науч.-техн. конф. проф.-преп. и инж.-техн. Состав: ПИИРС, 1996. С. 62.
6. Бурдин В.А., Головина О.П., Платонов А.Н. Модель воздействия импульсных электромагнитных полей на оптические кабели связи для подземной и воздушной прокладки // Тез. докл. I Поволжской научн.-техн. конф. по проблемам двойного применения – Самара, 1995. – с. 94.
7. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы // Сборник статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Издательство «Connect», 2000. – 376 с.
8. Agrawal Govind P. Nonlinear fiber optics. – Boston: Academic Press, 2000. P. 458.
9. Becter P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers. – Boston: Academic Press, 1999. P. 460.
10. Agrawal Govind P. Applications of Nonlinear fiber optics // Boston: Academic Press, 2001. P. 466.
11. А.с. 1697035 СССР, МКИ5 G 02 В 6/28. Волоконно-оптический разветвитель / Р.А. Тухватуллин, Л.Е. Виноградова, И.Л. Виноградова, С.П. Ржевский, Булл. № 45. – 1991.

12. А.с. СССР № 1760494, МКИ5 G 02 В 6/28 Волоконно-оптический разветвитель / Р.А. Тухватуллин, И.Л. Виноградова, Л.Е. Виноградова Бюлл. № 33. – 1992.
13. Султанов А.Х., Якубов Т.Я., Виноградова И.Л. Волоконно-оптический усилитель. Патент РФ № 2203502 от 25 апреля 2001 г., зарегистрирован в Гос. реестре изобретений 27.04.2003 г.
14. Виноградова И.Л., Султанов А.Х. Статистический подход к описанию интерферометров Фабри-Перо как элементов многолучевой интерференции в линиях связи // Радиотехника. 2000. № 1. С. 45-49.
15. Гауэр Дж. Оптические системы связи // Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. - 504 с.
16. Виноградова И.Л. Характеристики двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо // Радиотехника. 2002. № 6. С. 33-37.
17. ОСТ 45.104-97. Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Стандарт отрасли. М.: ЦНТИ «Информсвязь». – 1997. – 27 с.
18. Рекомендация МСЭ-Т G.703. Физические и электрические характеристики иерархических цифровых стыков. М.: ЦНТИ «Информсвязь». 1988. – 63 с.
19. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH // М.: Издательство Эко-Трендз, 2000. – 148 с.
20. Лощенков А.А., Виноградова И.Л. Лазеры накачки для усилителя EDFA на сегменте волоконно-оптической линии связи // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докладов Пятой международной научн.-техн. конф. ПГАТИ, Самара. 2004. С. 34-38.
21. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л. Сегмент системы передачи с усилителем EDFA // Датчики и системы, 2002. № 4, С. 21–33.
22. Султанов А.Х., Шарифгалиев И.А., Канаков В.И., Виноградова И.Л. Исследование влияния нелинейных оптических эффектов в мелкозернистых стёклах на передаваемый импульсный сигнал // Вестник УГАТУ, 2004. № 1. С. 24-31.
23. Султанов А.Х., Канаков В.И., Виноградова И.Л. Нелинейные оптические эффекты в волоконно-оптических компонентах, построенных на основе деформированных стёкол. // Инфокоммуникационные технологии. 2003. № 2. С. 47–52.
24. Гусев А.И., Ремпель А.А. Поликрист-таллические материалы // М.: Физ.-мат. лит., 2001. – 224 с.
25. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией // М.: Издательство «Логос», 2000.– 346с.
26. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л. Сегмент синхронной сети с восстановлением сигнала без оптоэлектронного преобразования // УГАТУ. Уфа, 2002. – 30 с.
27. Усманов Р.Г. Исследование появления многофотонного поглощения и параметрической генерации в сегменте синхронной сети с эрбиевым усилителем // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докладов Международной науч. - техн. конф. RLNC`2002. Воронеж, НПФ «Саквое», 2002. С. 1221-1230.
28. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия // Отв. Ред. М.Е. Жаботинский. М.: Сов. Энциклопедия, 1969. – 432 с.
29. Сивухин Д.В. Общий курс физики // Оптика. - М.: Наука, 1980. - 752 с.
30. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света // Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 520 с.
31. Бурдин В.А. Основы моделирования кусочно-регулярных волоконно-оптических линий передачи сетей связи // М.: Радио и связь, 2002. – 310 с.

Approach to construction of optical signals switchboards, controlled by optical radiation

A.H. Sultanov¹, I.L. Vinogradova¹
¹ Ufa State Aviation Technical University

Abstract

This article is devoted to the study of the possibility of creating switches for optical signals controlled additionally by the applied optical radiation. It is assumed that the control radiation changes the refractive index of the optical medium of the device and the wavelength of the information radiation together with it. A multibeam interferometer is used to control the latter. Technical aspects of the device design are evaluated briefly. The analysis shows that the interference switch is technically feasible in theory. Its main disadvantages include the presence of a constant component in the interference pattern and distortion of the digital optical signal by interference and nonlinear optical effects.

Keywords: optical signals switchboards, optical radiation, radiation change, optical medium, interferometer, digital optical signal, nonlinear optical effects.

Citation: Sultanov AH, Vinogradova IL. Approach to construction of optical signals switchboards, controlled by optical radiation. *Computer Optics* 2004; 26: 56-64.

References

- [1] Rules on design of power electric installations. Sixth edition, amended and revised by Glavgosenergonadzor of the Russian Federation [In Russian]. Saint-Petersburg: Dean Publishing House; 2000.
- [2] Ubaydullayev RR. Optic fiber networks [In Russian]. Moscow: "Eco-Trends" Publisher; 2000.
- [3] Matveev AN. Optics [In Russian]. Moscow: "Vysshaya Shkola" Publisher; 1985.
- [4] Sultanov AK, Usmanov RG, Vinogradova IL, Alkin YP. Reconstruction of a departmental network "Bashkirenergo" [In Russian]. *VKSS* 2002; 3: 60-69.
- [5] Burdin VA, Golovina OP, Platonov AA. Electrical discharge resistance of optical fibers. In Book: Proceedings of Russian scientific and technical conference of academic and engineering staff. Samara: PIIRS Publisher; 1996: 62.
- [6] Burdin VA, Golovina OP, Platonov AN. Simulation of the impact of pulsed electromagnetic fields on underground and aerial optical communication cables. In Book: Proceedings of the Ith Povolzhskaya scientific and technical conference on the problems of dual application. Samara: 1995: 94.
- [7] Dmitriev SA, Slepov NN, eds. Fiber-optics technology: history, achievements, prospects. Moscow: "Connect" Publisher; 2000.
- [8] Agrawal GP. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press; 2000.
- [9] Becter PC, Olsson NA, Simpson JR. Erbium-doped fiber amplifiers. Boston: Academic Press; 1999.
- [10] Agrawal GP. Applications of nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press; 2001.
- [11] Tikhvatullin RA, Vinogradova LE, Vinogradova IL, Rzhovsky SP. Fiber-optic splitter [In Russian]. USSR Inventor's certificate SU 1697035, MKI5 G 02 B 6/28 of December 7, 1991. *Russian Bull of Inventions* N45; 1991.
- [12] Tikhvatullin RA, Vinogradova IL, Vinogradova LE. Fiber-optic splitter [In Russian]. USSR Inventor's certificate SU 1760494, MKI5 G 02 B 6/28 of September 7, 1992. *Russian Bull of Inventions* N 33; 1992.
- [13] Sultanov AH, Yakubov TY, Vinogradova IL. Fiber optic amplifier. Pat RF of Invent N 2203502 of April 25, 2001.
- [14] Vinogradova IL, Sultanov AH. A statistical approach to the description of Fabry-Perot interferometers as elements of multibeam interference in communication lines [In Russian]. *Radiotekhnika* 2000; 1: 45-49.
- [15] Gowar J. Optical communication systems. Prentice Hall; 1993.
- [16] Vinogradova IL. Characteristics of two-resonator Fabry-Perot interferometer [In Russian]. *Radiotekhnika* 2002; 6: 33-37.
- [17] OST 45.104-97. Optical interfaces of synchronous digital hierarchy transmission systems [In Russian]. Industry standard. Moscow: "Informsvyaz" Publisher; 1997.
- [18] ITU-T Recommendation G.703. Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces [Un Russian]. Moscow: "Informsvyaz" Publisher; 1988.
- [19] Slepov NN. Synchronous digital networks SDH [In Russian]. Moscow: "Eco-Trends" Publisher; 2000.
- [20] Loshenkov AA, Vinogradova IL. Pump laser for EDFA amplifier in fiber optic communication line segment. Problems of engineering and telecommunication technologies. In Book: Proceedings of the Fifth international scientific and technical conference. Samara: PSUTI Publisher; 2004: 34-38.
- [21] Sultanov AH, Yakubov TY, Vinogradova IL. Fiber optic communication line segment containing amplifier EDFA [In Russian]. *Sensors and Systems* 2002; 4: 21-33.
- [22] Sultanov AH, Sharifgaliev IA, Kanakov VI, Vinogradova IL. Research of influence of nonlinear optical effects in fine-grained glasses on the transmitted pulse signal [In Russian]. *Vestnik USATU* 2004; 1: 24-31.
- [23] Sultanov AH, Kanakov VI, Vinogradova IL. Nonlinear optical effects in fiber optic components based on deformed glasses [In Russian]. *Infocommunication Technologies* 2003; 2: 47-52.
- [24] Gusev AI, Rempel AA. Polycrystalline materials [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2001.
- [25] Valiev RZ, Alexandrov IV. Nanostructured materials produced by severe plastic deformation [In Russian]. Moscow: "Logos" Publisher; 2000.

- [26] Sultanov AH, Usmanov RG, Vinogradova IL. Segment of a synchronous network with signal recovery without optic-to-electronic transduction [In Russian]. Ufa: "USATU" Publisher; 2002.
- [27] Usmanov RG. Research of multiphoton absorption and parametric generation in a segment of a synchronous network with an erbium amplifier [In Russian]. In Book: Radiolocation, navigation, communication: Proceedings of the International scientific and technical conference RLNC'2002. Voronezh: "NPF Sakvoe" Publisher; 2002: 1221-1230.
- [28] Zhabotinsky ME, ed. Quantum electronics: a small encyclopedia [In Russian]. Moscow: "Sovetskaya Encyclopedia" Publisher; 1969.
- [29] Sivukhin DV. General course of physics: Optics. Moscow: "Nauka" Publisher; 1980.
- [30] Gibbs HM. Optical bistability: controlling light with light. Orlando, FL: Academic Press; 1985.
- [31] Burdin VA. Model of piecewise-regular fiber optic transmission lines of communication networks [In Russian]. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 2002.