

Учебный курс
«ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Тема :

**Волоконно-оптические технологии и
техника**

Лектор:

кфмн, доцент Гришачев Владимир Васильевич

Программа курса

ЛЕКЦИИ

- I. Фотонные технологии
- II. Волоконно-оптический транспорт
- III. Волоконно-оптические преобразователи
- IV. Волоконно-оптическая техника**
- V. Рефлектометрия оптических волокон

- VI. Коллоквиум

- VII. Лабораторный практикум

Лекция 7-8

«Волоконно-оптическая техника»

1. Пассивные волоконно-оптические элементы: неразъемное соединение волокон.
2. Пассивные волоконно-оптические элементы: разъемное соединение волокон
3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление светового потока.
4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление световым потоком.
5. Активные волоконно-оптические элементы.
6. Волоконно-оптические усилители и лазеры.
7. Интегрально-оптические устройства.
8. Оборудование систем мониторинга оптической сети.

ВОТ: понятие, назначение, классификация.

○ Понятие

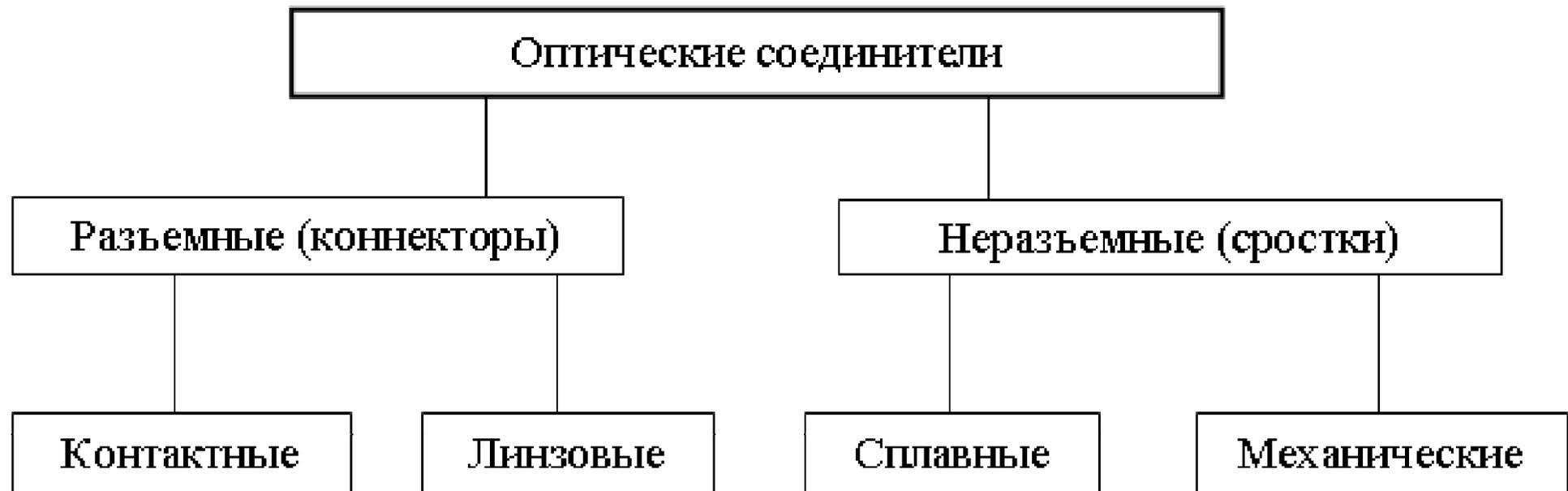
- ❖ волоконно-оптическая техника – приборы, устройства, структурные элементы обеспечивающие функционирование основных направлений применения волоконно-оптических технологий:
 - оптический (фотонный) транспорт энергии и информации;
 - оптические (фотонные) преобразования с целью проведения измерения и с целью создания оптических устройств;

- ❖ волоконно-оптическая техника делится на
 - пассивную, в которой происходит изменение параметров оптического излучения без использования внешних, как правило электрических, источников питания;
 - активную, в которых для изменения параметров излучения требуются внешние источники питания;
 - устройства, приборы, имеющие самостоятельное назначение;

1. Пассивные волоконно-оптические элементы: соединение волокон

○ Соединение волокон

образование неразрывного торцевого с малыми оптическими потерями оптического контакта двух волокон с фиксацией различными методами;



- разъемное соединение: многократно повторяемая фиксация оптического контакта волокон с возможностью их последующего разъединения;
- неразъемное соединение: одномоментная фиксация оптического контакта волокон без возможности их разъединения;

1. Пассивные волоконно-оптические элементы: соединение волокон

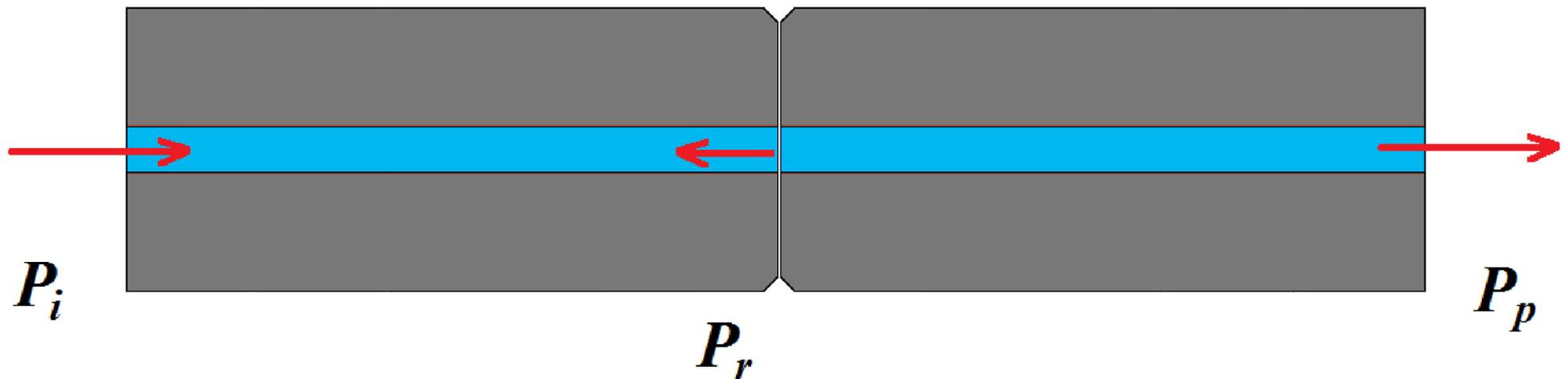
○ Характеристика соединения волокон определяется

— вносимыми потерями

$$\beta_p = 10 \cdot \lg(P_p / P_i) \text{ dB}$$

— возвратными потерями

$$\beta_r = 10 \cdot \lg(P_r / P_i) \text{ dB}$$



P_i – мощность оптического излучения на подходе к соединению, P_p – после прохождения соединения, P_r – возвращаемая от соединения, которые выражаются в dB

1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ **Неразъемное сращивание волокон: сварка**

сварка оптики (сварка оптоволокна, сварка оптических волокон, сварка ВОЛС, fusion splicing) — процесс соединения оптических волокон (жил оптического кабеля) путем сплавления их торцов с помощью кратковременной высокотемпературной (более 1500⁰С) термической обработки места соединения в электрической дуге, пламени газовой горелки, мощного лазерного излучения.

процесс сварки включает

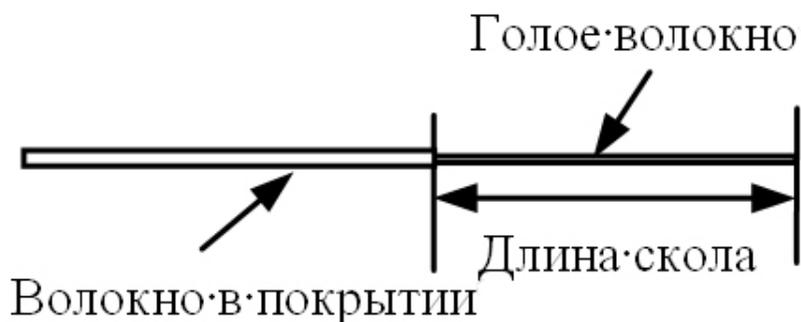
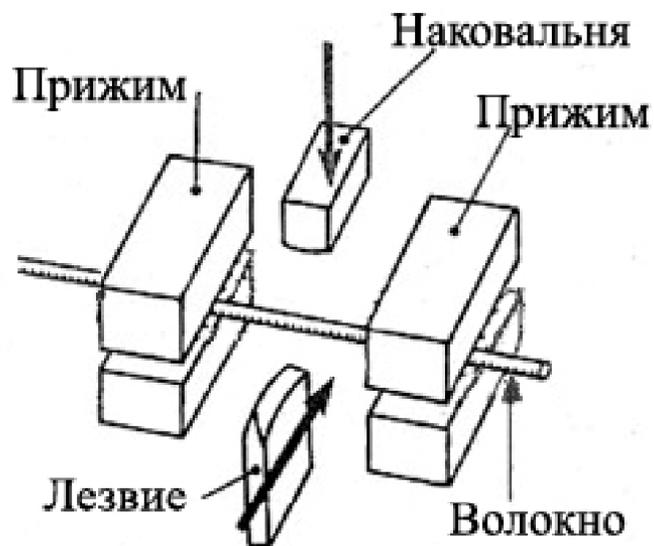
- подготовку поверхностей торцов свариваемых волокон;
- размещение волокон в печи, юстировку торцов друг относительно друга;
- расплавление торцов в электрической дуге и их фиксация;
- проверка качества соединения и герметизация (защита) участка сварки;

1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ Неразъемное сращивание волокон: сварка

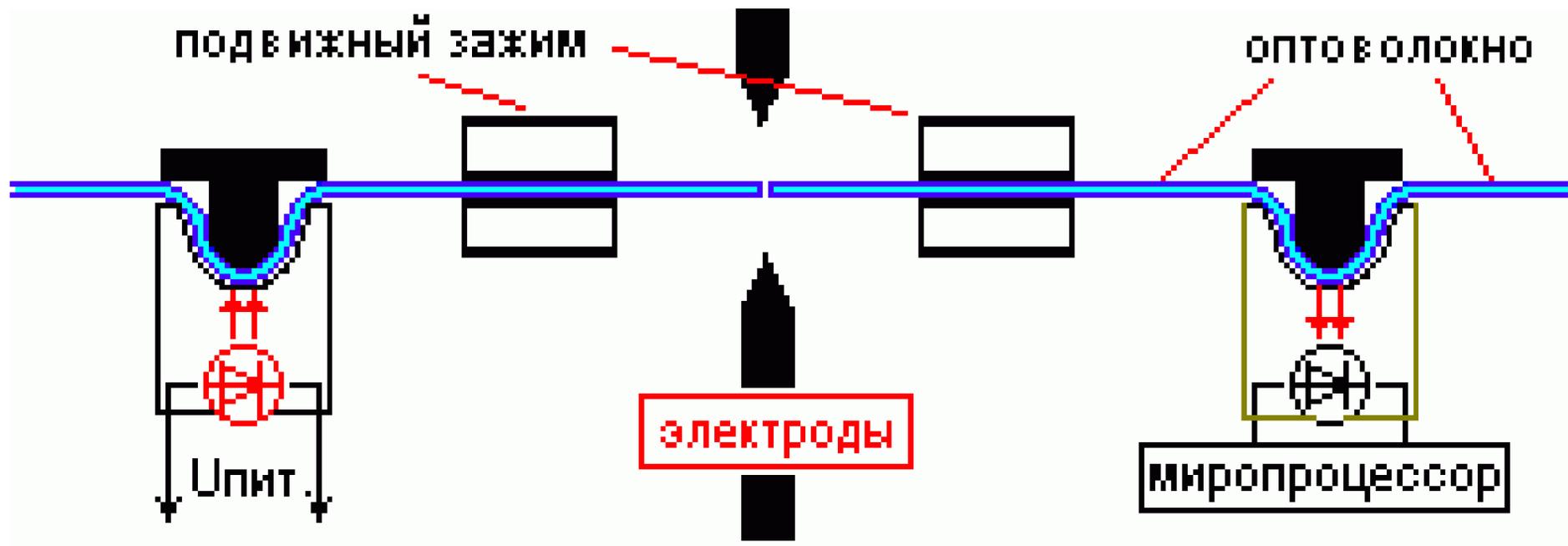
подготовка поверхностей торцов свариваемых волокон – скалывание

принцип действия



1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

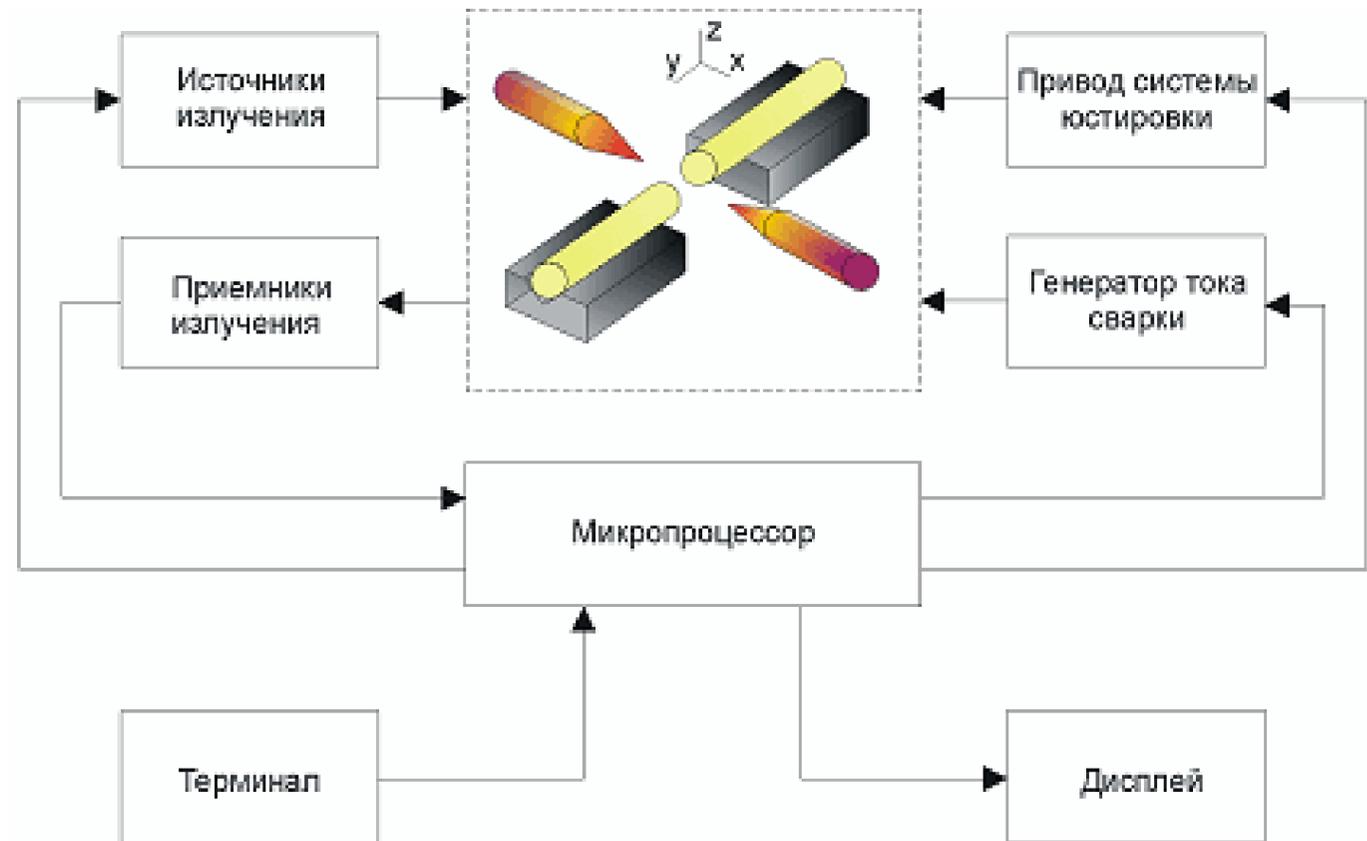
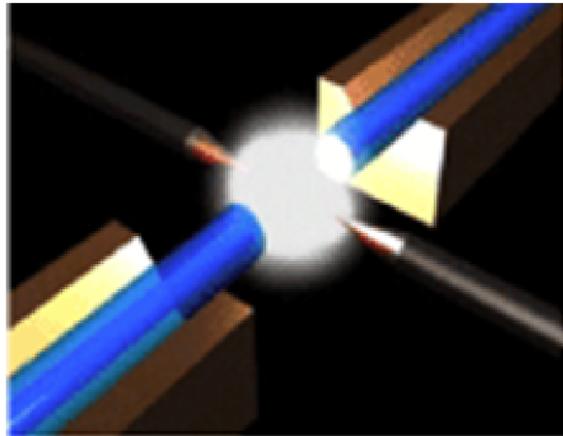
○ Неразъемное сращивание волокон: сварка



— процедура сварки волокон позволяет достичь вносимых потерь на уровне не более 0,1 dB до 0,01 – 0,02 dB

1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

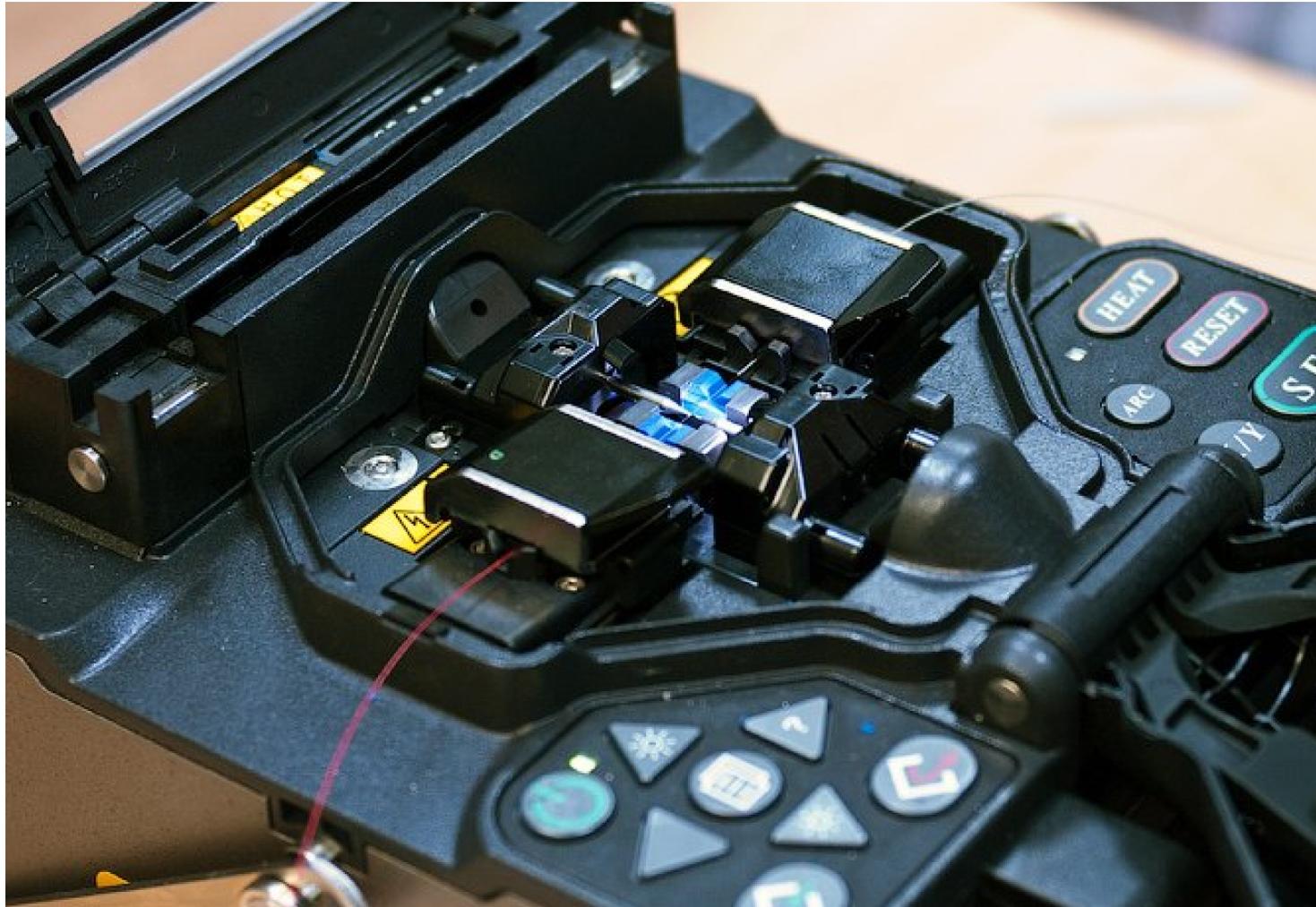
○ Неразъемное сращивание волокон: сварка



— процедура сварки волокон может быть полностью автоматизирована, за исключением подготовки волокон и их торцов к сварки

1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

- **Неразъемное сращивание волокон: сварка**



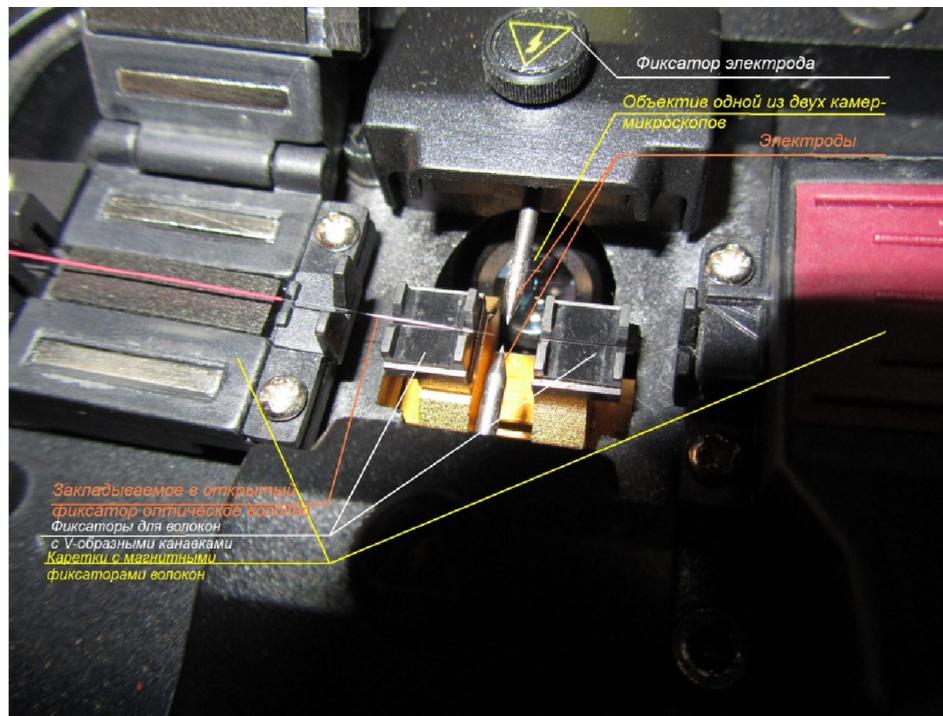
1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ Неразъемное сращивание волокон: сварка

реализуется в виде

одноволоконной дуговой сварки – один из наиболее распространенных методов сварки, предполагающий сварку одной пары волокон, допускает использование метода автоматического центрирования.

многоволоконная дуговая сварка - предполагает одновременную сварку сразу нескольких пар волокон (от 4 до 12 пар).



1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ Неразъемное сращивание волокон: дефекты сварки волокон

типичные искажения сварных соединений примерно так, как они видны на экране сварочного аппарата



на качество сварки волокон методом V– groove (при центрировании в V-образном пазе) влияет:

- разброс значений диаметров оболочки (cladding diameter distribution);
- concentricity сердцевина/оболочка (core/clad concentricity);
- неоднородности оболочки волокна (fiber curl) – утолщения или полости

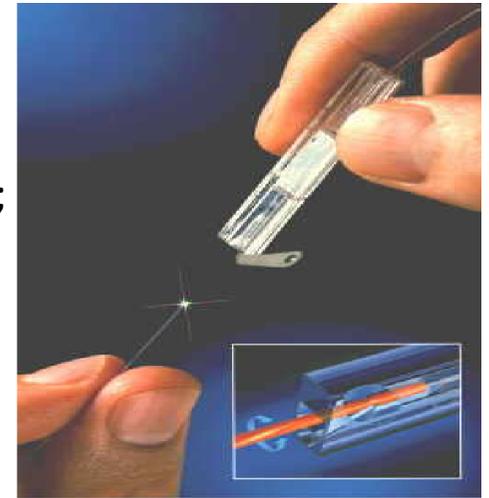
1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ Неразъемное сращивание волокон: механический сплайс (splice)

устройство, в котором через специальные направляющие навстречу друг другу вводятся подготовленные концы оптических волокон и фиксируются в нем, стык между волокнами помещают в специальный (иммерсионный) гель уменьшающий потери.

технология соединения включает в себя несколько этапов:

- разделка волоконно-оптического кабеля и подготовка торцов волокна;
- выполнение соединения и фиксация положения волокон;
- тестирование и оценка качества соединения;
- нанесение защитных покрытий, восстановление защитной оболочки.



применение сплайсов облегчает процесс сращивания оптоволокна, вносимые потери могут составлять 0,1 dB и выше, но не должны превышать 0,3 dB



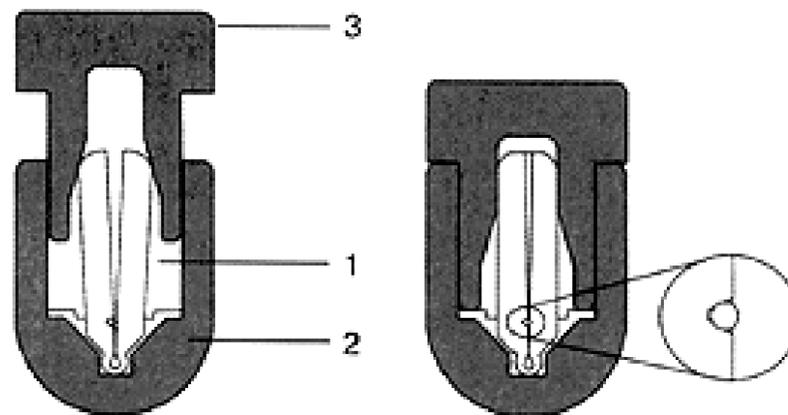
1. Пассивные элементы: неразъемное соединение волокон

○ Неразъемное сращивание волокон: механический сплайс (splice)

Fibrlok II (Файберлок) используется при необходимости быстро соединить оптические волокна на любом кабеле (воздушной, в грунте, в канализации), применение идеально для проведения ремонтных работ и, в некоторых случаях, при строительстве новых линий, он предназначен для работы как с одномодовыми, так и многомодовыми волокнами со стандартным диаметром защитного покрытия.



диаметр волокна/покрытия	125/250,900 мкм
время монтажа	не более 30 сек.
средние потери на стыке	не более 0,1 дБ
возвратные потери	не более 35 дБ
при -40°C и $+80^{\circ}\text{C}$	не более 60 дБ
при комнатной температуре	
нагрузка на разрыв	$> 0,45$ кг в среднем 1,35 кг
диапазон рабочих температур	от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$



1 — центрирующий элемент;
2 — корпус; 3 — крышка Fibrlok II

2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Разъемное соединение волокон

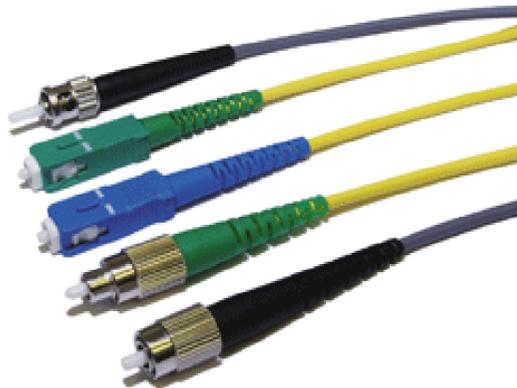
построение масштабируемых сетей, локальных систем связи, структурированных кабельных систем на объекте информатизации требует возможности оперативного многократного соединения и отсоединения терминального оборудования, активного оборудования без значительных энергетических потерь и ухудшения передачи информации.

разъемные соединения включают

коннектором/разъем – оконцованное волокно с приспособлением для механического подсоединения к другой части оптической сети;

переходник/адаптер – устройство для фиксации двух кабелей с коннекторами;

розетка – элемент сети для присоединения к терминальному оборудованию;



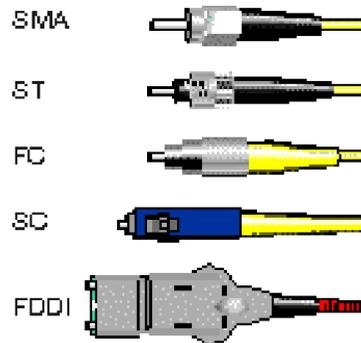
2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Разъемное соединение волокон: коннекторы

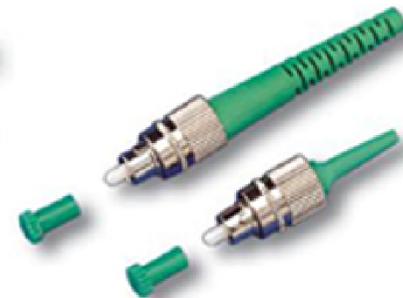
по типу механической фиксации оптического волокна между собой и для присоединения к терминальному оборудованию различают коннекторы:

FC, SC, ST, LC

Коннекторы



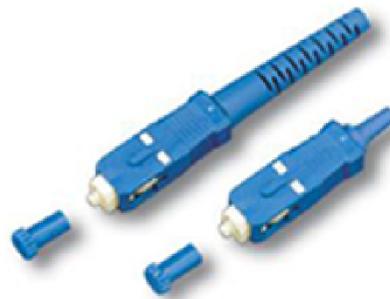
Коннектор FC



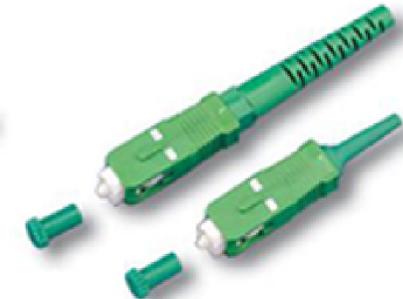
Коннектор FC/APC



Коннектор LC



Коннектор SC



Коннектор SC/APC



Коннектор MTRJ



Коннектор DIN



Коннектор SC duplex



Коннектор ST



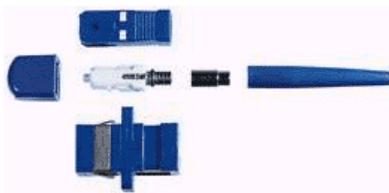
Коннектор E



Коннектор MU

2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Разъемное соединение волокон: коннектор



Оптический коннектор состоит из корпуса, внутри которого расположен наконечник (феррула) с прецизионным продольным концентрическим каналом. Диаметр канала зависит от того, какое оптическое волокно будет использоваться - одномодовое или многомодовое. Для одномодового волокна диаметр канала феррулы равен 125,5-127 мкм, для многомодового 127-130 мкм. Наиболее распространенный внешний диаметр феррул — 2,5 мм, но в оптических коннекторах с малым форм-фактором используются феррулы диаметром 1,25 мм. Стандартно в качестве материала феррул используется диоксид циркония.

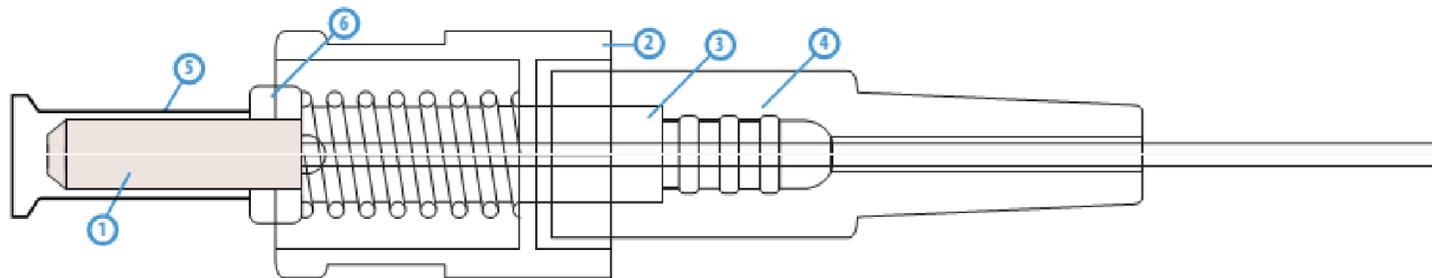
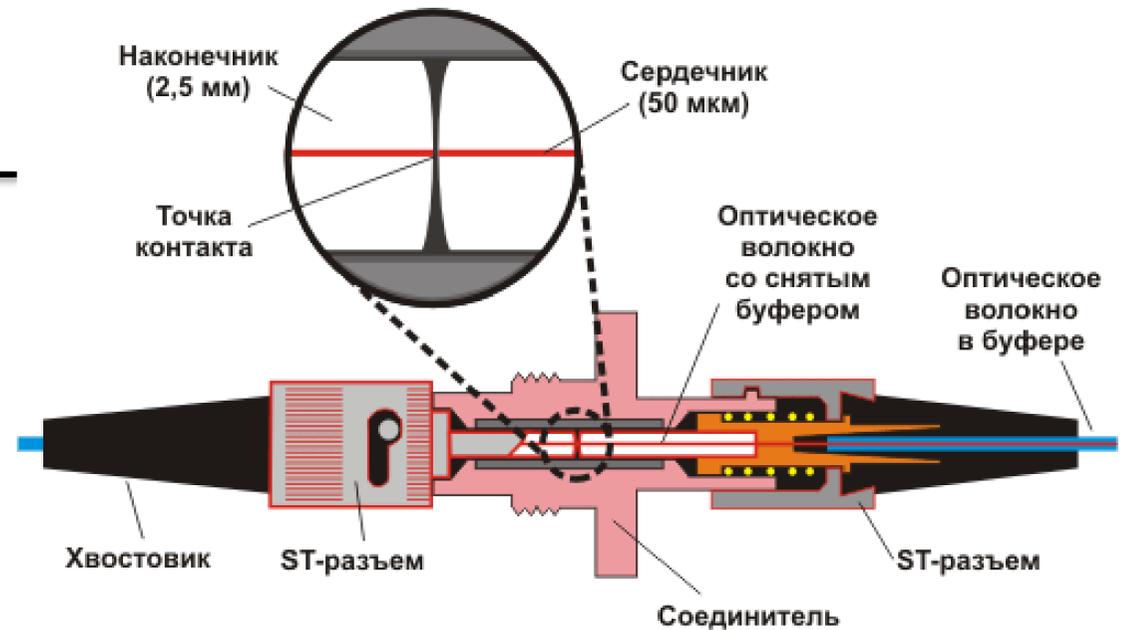
Феррула соединяется с оптическим волокном: волокно без оболочки вставляется в канал наконечника и фиксируется, выступающий конец волокна скалывается параллельно с поверхностью торца феррулы, сам торец феррулы полируется. Далее феррула с волокном совмещается с корпусом разъема. После соединения волокна и феррулы, сборка тестируется на наличие дефектов (на микроскопе или интерферометре). Для одномодового волокна точность выравнивания волокна в ферруле должна быть выше, чем 0,5 мкм, угловое отклонение не более 5 гр., а возвратные потери не менее 40 дБ.

Волокно закрепляется в оптическом коннекторе с помощью эпоксидной смолы.

Торец феррулы полируется для обеспечения наиболее плотного соединения коннекторов.

2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Механический коннектор ST



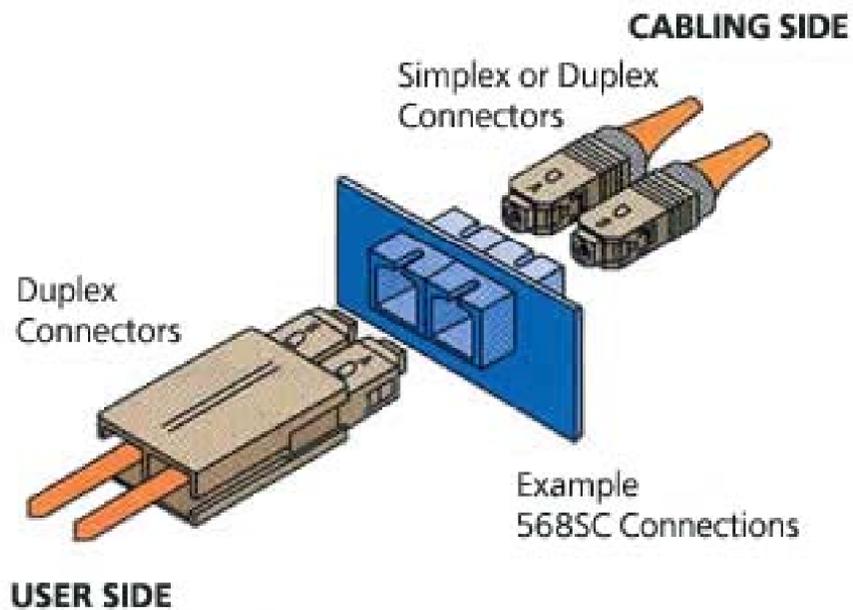
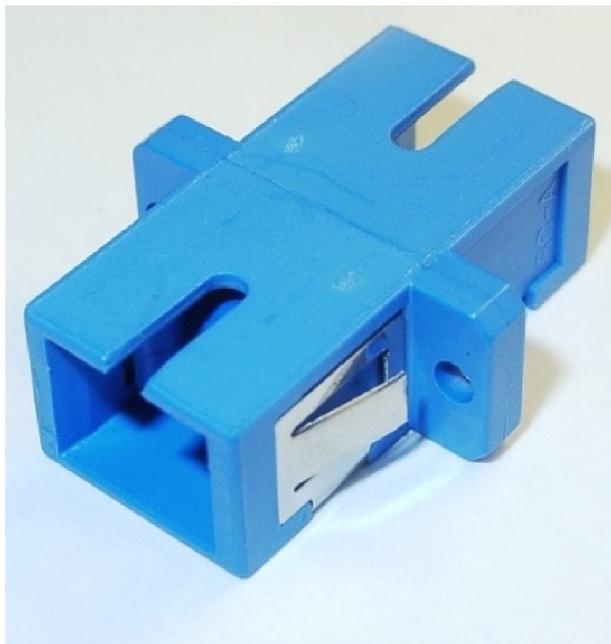
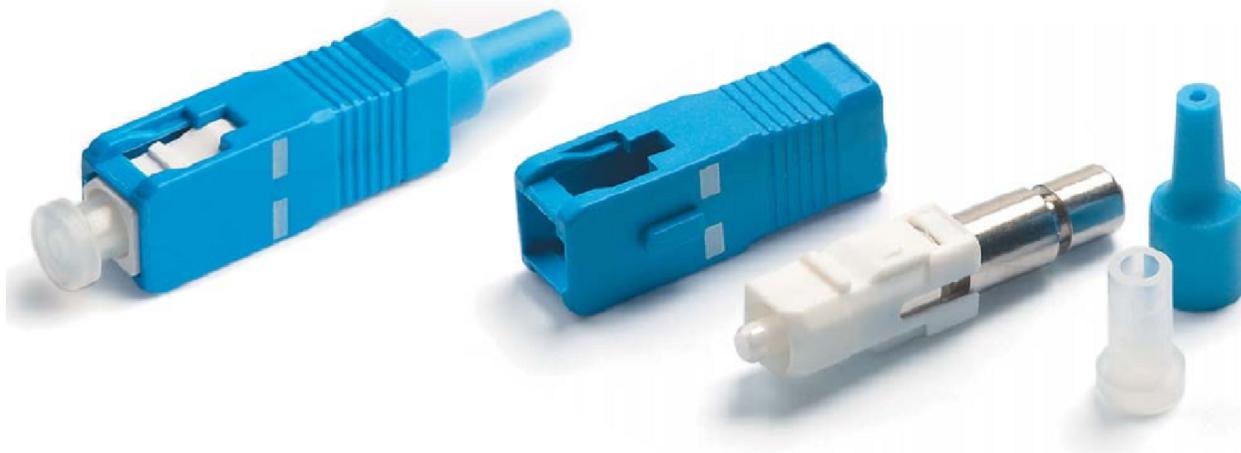
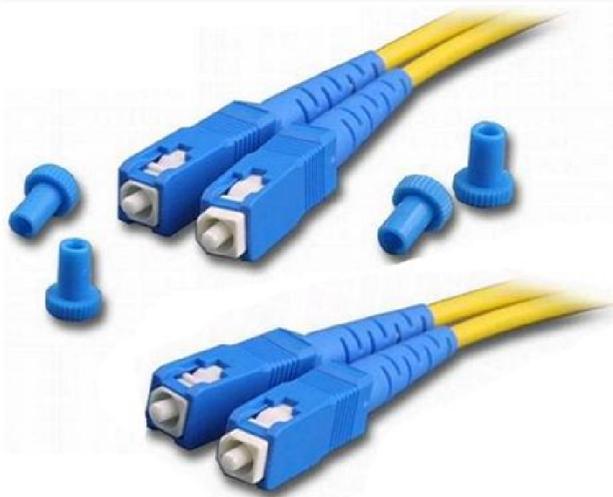
Разъем типа ST состоит из:

1. Наконечник (фerrул)
2. Стыковочная гайка (bayonet)
3. Гильза для обжима кевларовых нитей
4. Пластиковый хвостовик для кабеля (бывает двух видов для кабеля 0,9 мм и 3 мм)
5. Пылезащитный колпачок
6. Выравнивающий ключ



2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Механический коннектор SC



2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Разъемное соединение волокон: обработка торцов

методы (полировки) обработки торца штекера (феррула):

Physical Contact (PC)/

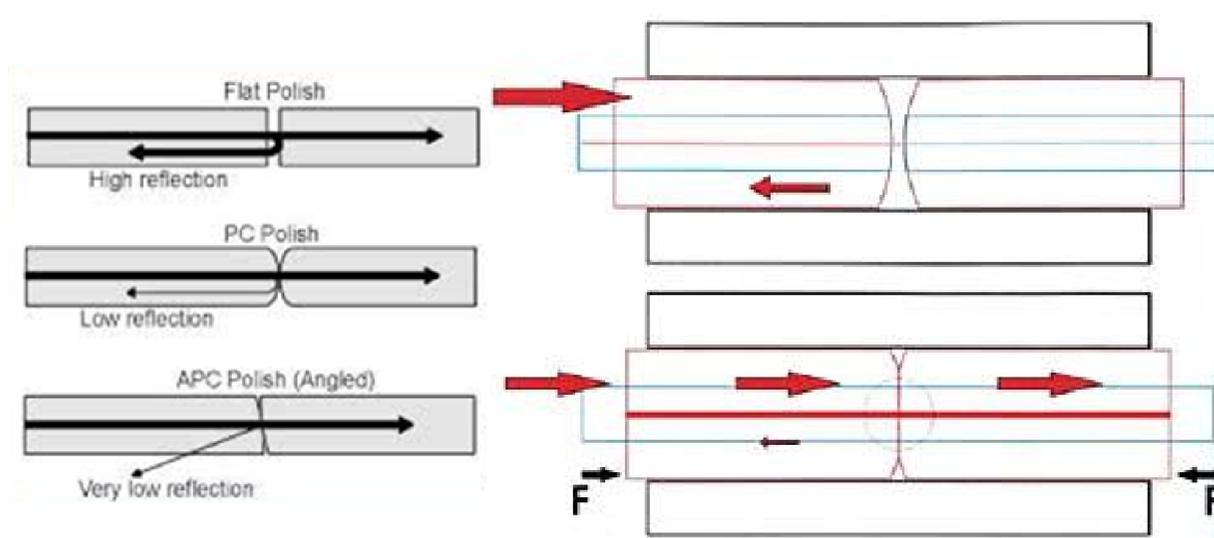
Super Physical Contact (SPC),

Ultra Physical Contact (UPC),

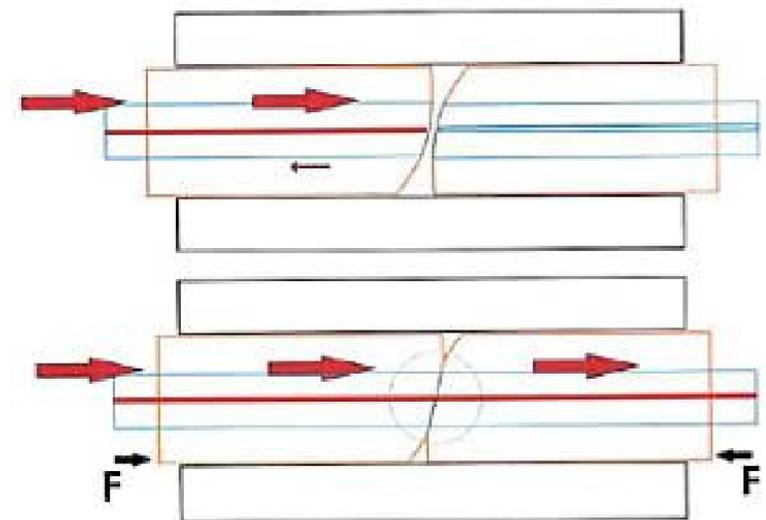
Angled Physical Contact (APC)

Зависимость вносимых потерь от способа полировки		
Серия	Вносимое затухание, дБ	Обратное отражение, дБ
Flat	0,2	-14
PC	0,2	-25...-30
Super PC	0,2	-35...-0
Ultra PC	0,2	-45...-50
Angled PC	0,3	-60...-70

потери при полировке PC и UPC

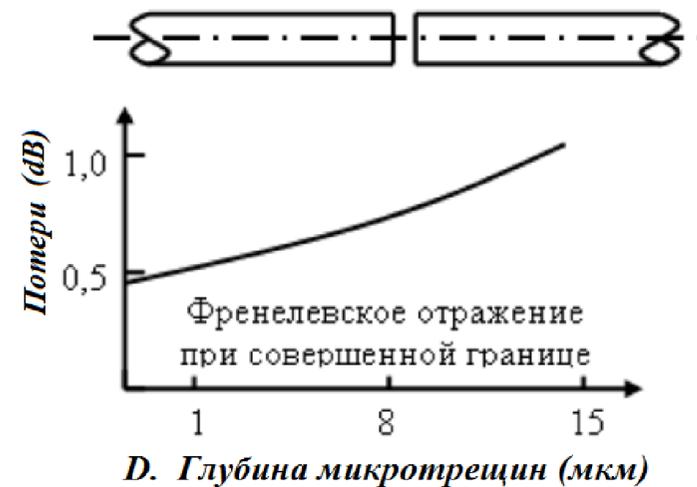
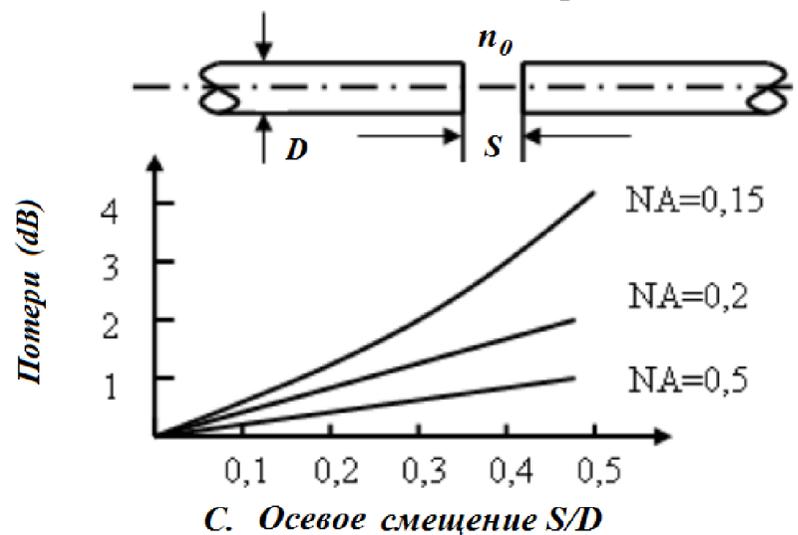
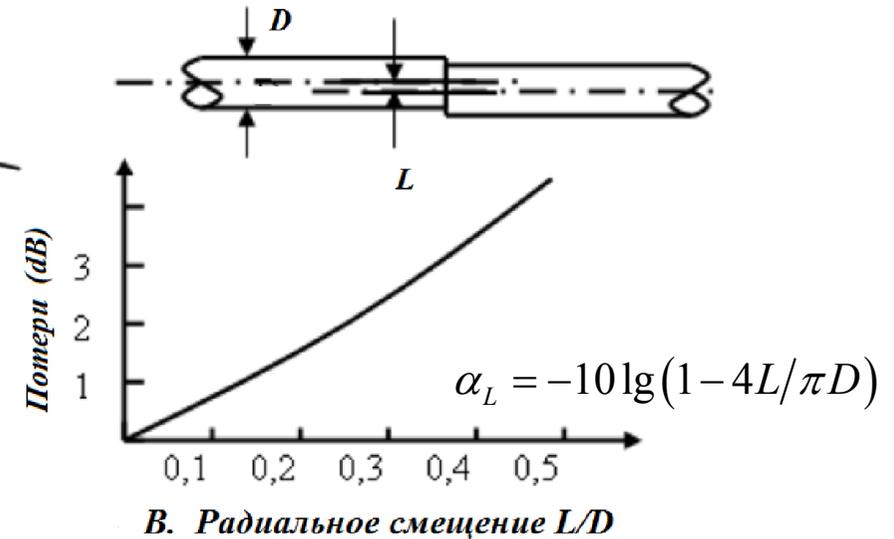
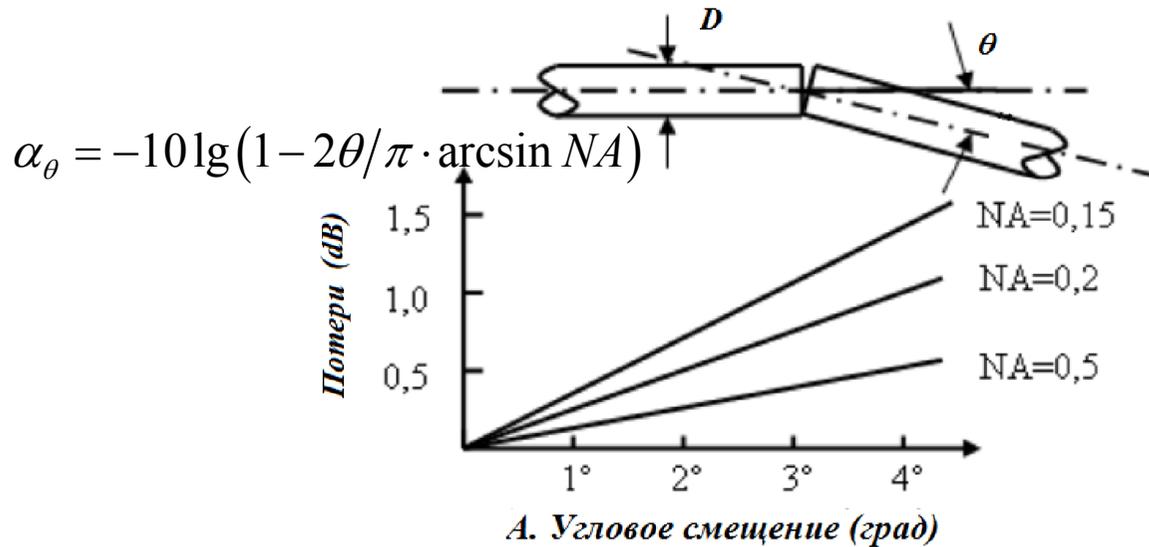


APC



2. Пассивные элементы: разъемное соединение волокон

○ Разъемное соединение волокон: потери



$$\alpha_s = 20 \lg(1 + 2(S/D) \operatorname{tg}[\arcsin(NA/n_0)])$$

2. Пассивные волоконно-оптические элементы: соединение волокон

○ Сравнение типов соединения

операция соединения волокон предназначена обеспечить оптическое объединение элементов оптической сети с наименьшими потерями и высокой надежностью за минимальное время с наименьшими затратами

- сварка позволяет осуществить соединение наиболее эффективно, но требует значительных затрат в виде специального оборудования;
- разъемное механическое соединение менее эффективно, но требует меньших затрат

	Одномодовое волокно		Многомодовое волокно	
	затухание, дБ	возвр. пот., дБ	затухание, дБ	возвр. пот., дБ
Автоматический сварочный аппарат	0,01...0,05	< -75	0,05...0,1	< -60
Ручной сварочный аппарат	0,2...0,5	< -40	0,2...0,4	< -40
Механический сплайс	0,2...0,5	< -35	0,2...0,4	< -35
Разъемное механическое соединение	0,2...0,5	< -30	0,2...0,4	< -30

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Делители и объединители

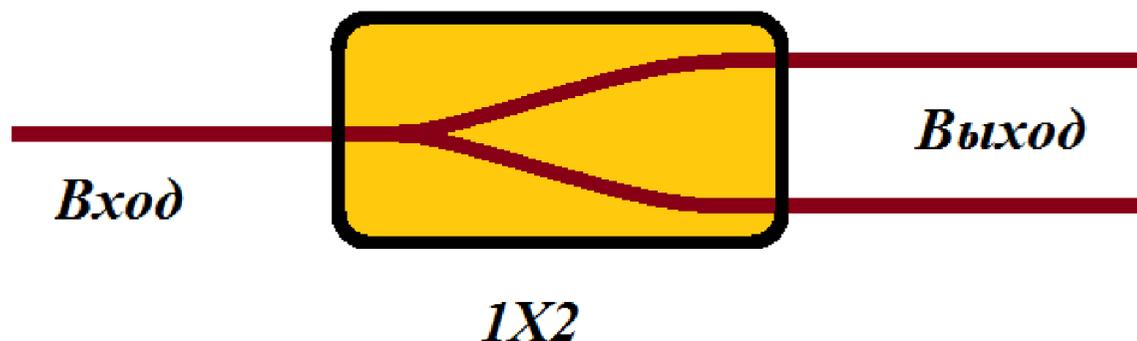
— волоконно-оптические устройства отвода части излучения, мощности из основного оптического волокна во вспомогательное волокно или объединение двух потоков, мощностей из двух волокон в одном волокне.

делители различают по

- количеству входов/выходов,
- технологии изготовления,
- длине волны

характеризуются

- коэффициентами передачи (Transfer Ratio) и направленности (Directivity);
- возвратными потерями (Return Loss), вносимыми потерями (Insertion Loss);
- рабочим диапазоном длин волн, температур, условиями эксплуатации;



как правило все устройства взаимны по направлению оптического потока

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Делители и объединители

ТИПЫ

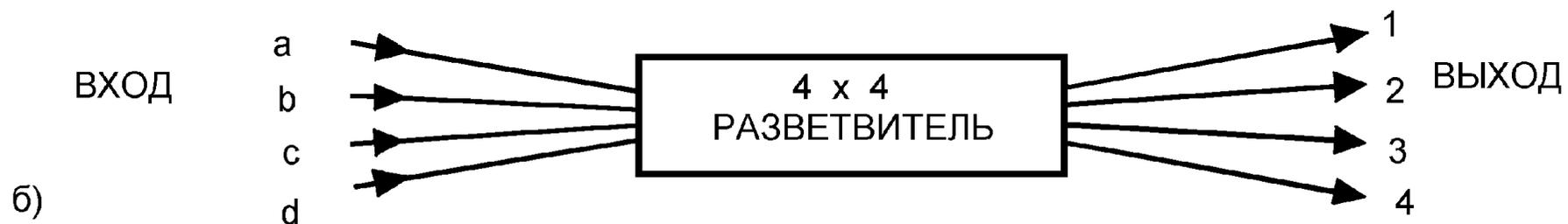
- с равномерным [делители (dividers), разветвители (splitters)];
- с неравномерным [ответвители (couplers, taps)] расщеплением мощности;
- также и объединители (combiners);

ВИДЫ

- древовидные (tree coupler) оптические многополюсники с обратимыми n – числом входов и m – числом выходов ($n \times m$ $n \neq m$), при подаче света в один из n – входов свет выходит в m – выходов и не выходит из оставшихся $n-1$ входов и наоборот при поступлении света на один из выходов
- звездообразные (star coupler) $n \times m$ $n = m$
- ответвители (tap) 1×2 и т.д – древовидный разветвитель с неравномерным делением мощности

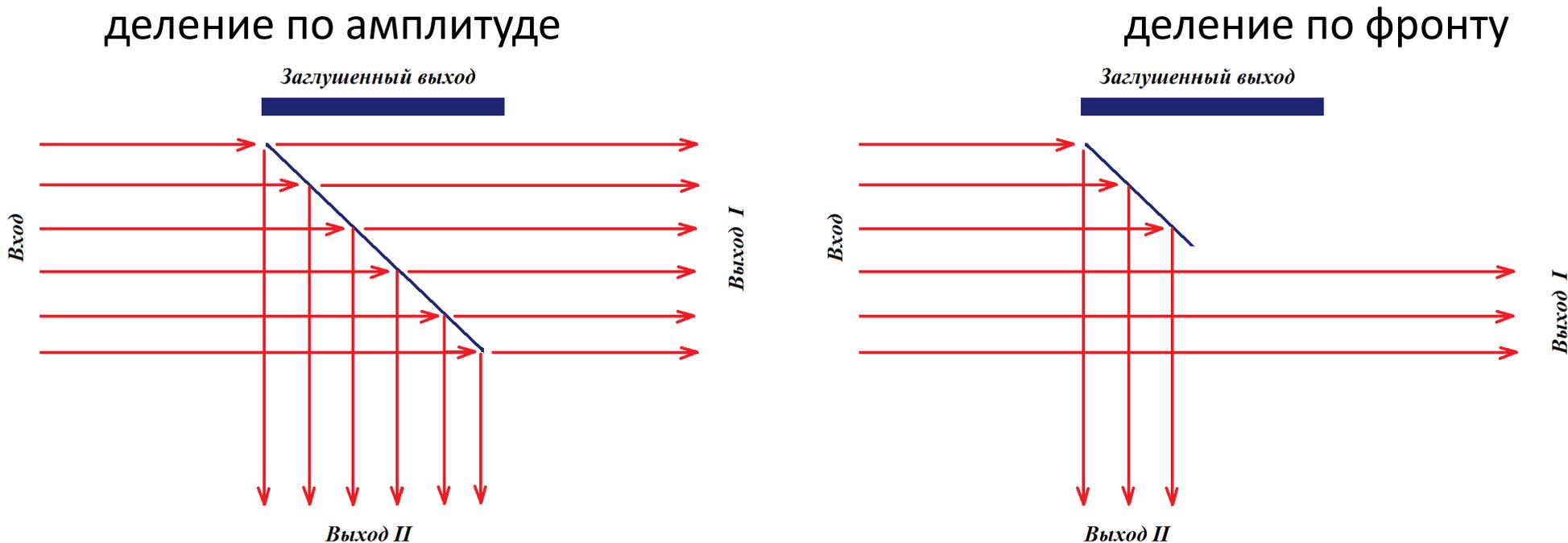
3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Делители и объединители



3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Деление светового потока



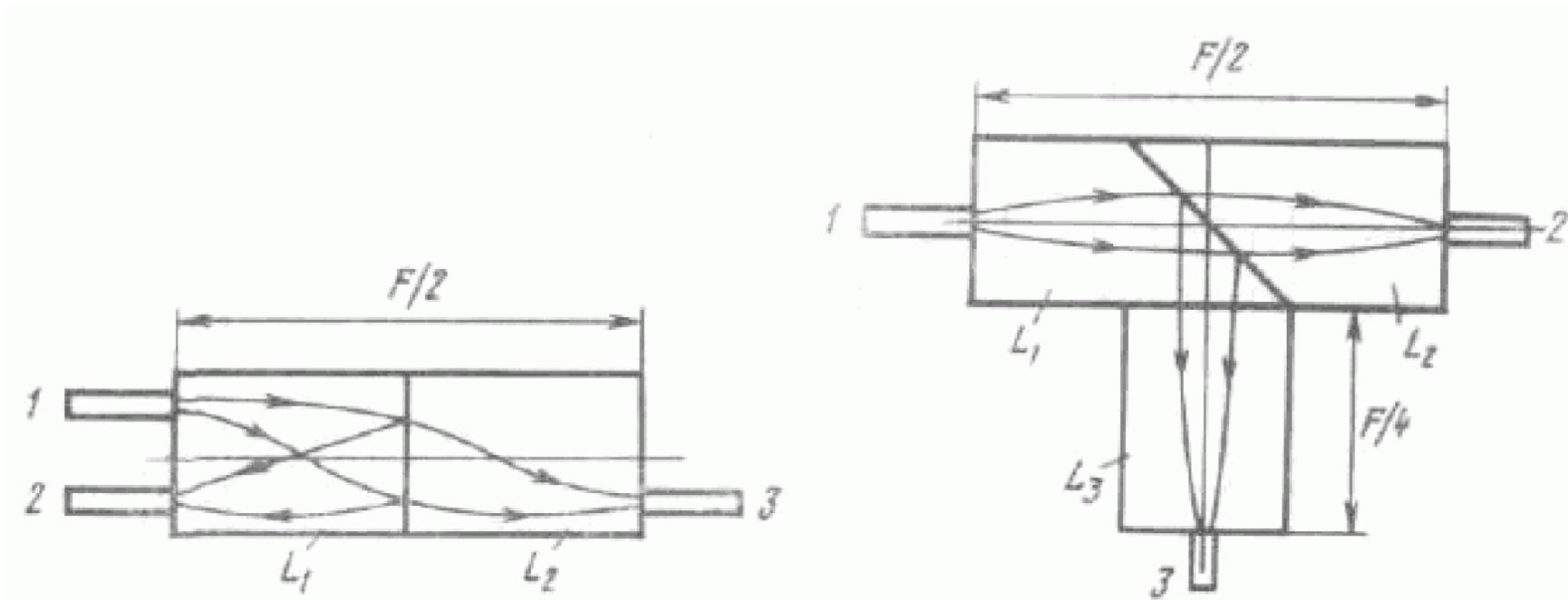
при делении по амплитуде весь фронт волны делится на границе раздела двух сред на две волны – преломленную (выход 1) и отраженную (выход 11);

при делении по фронту сам фронт делится на две части – проходящую мимо 100% зеркала (выход 1) и отраженную от 100% зеркала (выход 11);

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Деление светового потока

разветвители на цилиндрических градиентных линзах



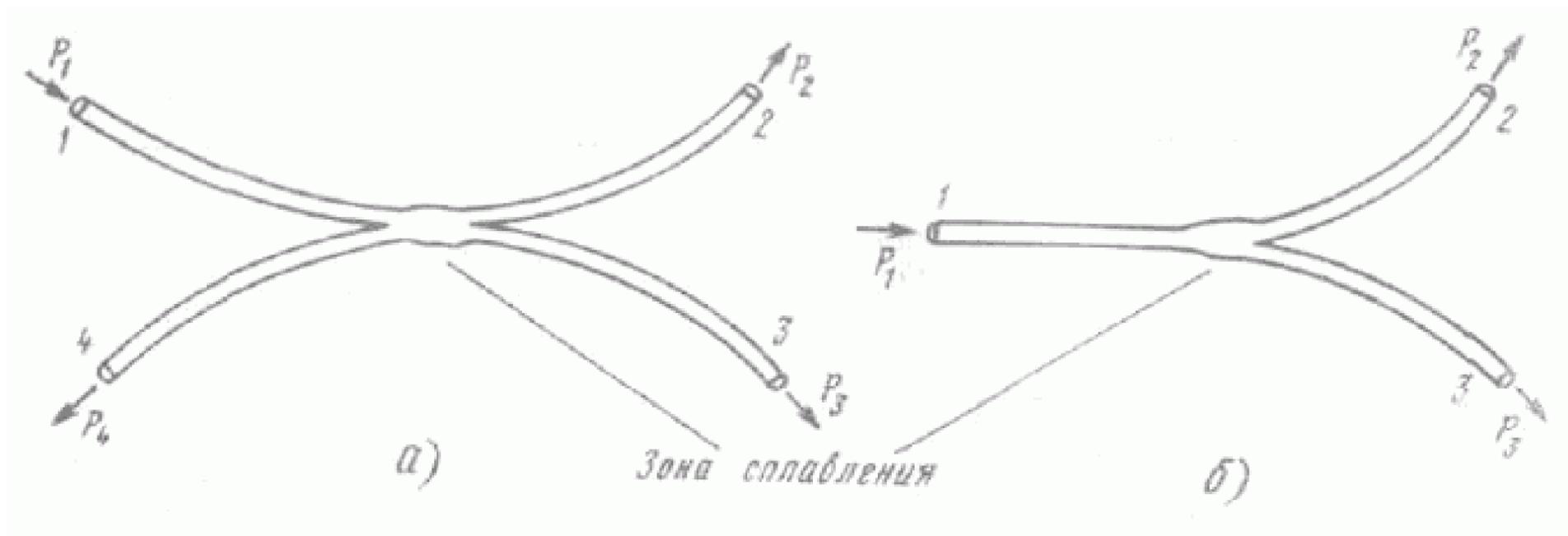
1,2,3 – соединяемые волокна, L – градиентные линзы с фокусным расстоянием кратным F

градиентная линза – цилиндрическая оптическая система с плавным изменением показателя преломления от центра к краям с цилиндрической симметрией

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Деление светового потока

направленные сплавные разветвители а) X-типа б) Y-типа



а) 1-2, 3-4 – оптоволокна с боковым сплавлением,

б) 1, 2, 3 – оптоволокна с торцевым сплавлением

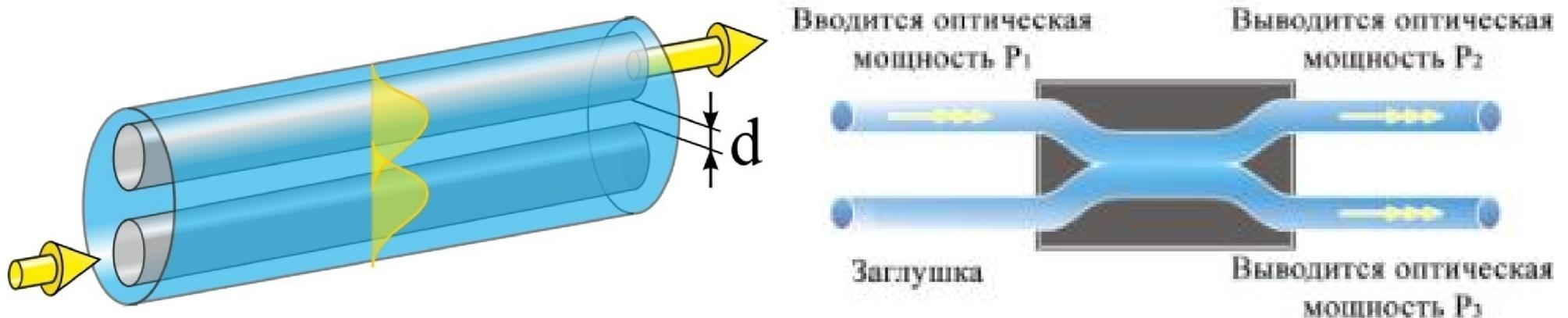
P_1 – оптическая мощность на входе разветвителя, P_2 , P_3 , P_4 – оптическая мощность на выходе разветвителя

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Деление светового потока туннелированием

оптическое туннелирование – переход оптического излучения из одного волокна в другое рядом расположенное оптическое волокно в нарушение полного внутреннего отражения, вследствие выхода оптического излучения за пределы сердцевины оптического волокна и захвата его другим волокном

изготовление по путем сплавления боковых поверхностей или толстопленочной технологии



3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Делители и объединители

технологии изготовления

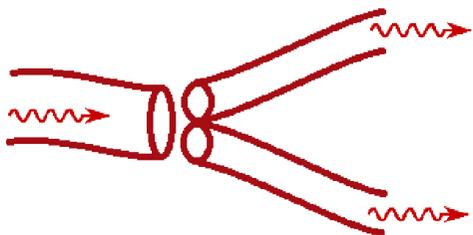
- микрооптическая – основана на использовании оптических элементов малого размера, интегрированных на единой жесткой подложке;
- сплавная (Fused Biconical Tapered, FBT) – основана на сплавлении при высокой температуре двух и более оптических волокон;
- планарная (Planar Lightwave Circuit, PLC) – основывается на несении на подложку в вытравленные участки оптически прозрачного материала, которые формируют волноводные каналы;
- интегрально-оптическая (фотонная) – основана на формировании оптических каналов, элементов в однородной оптической подложке путем имплантации добавок, меняющих оптические свойства подложки, нанесения управляющих структур

3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

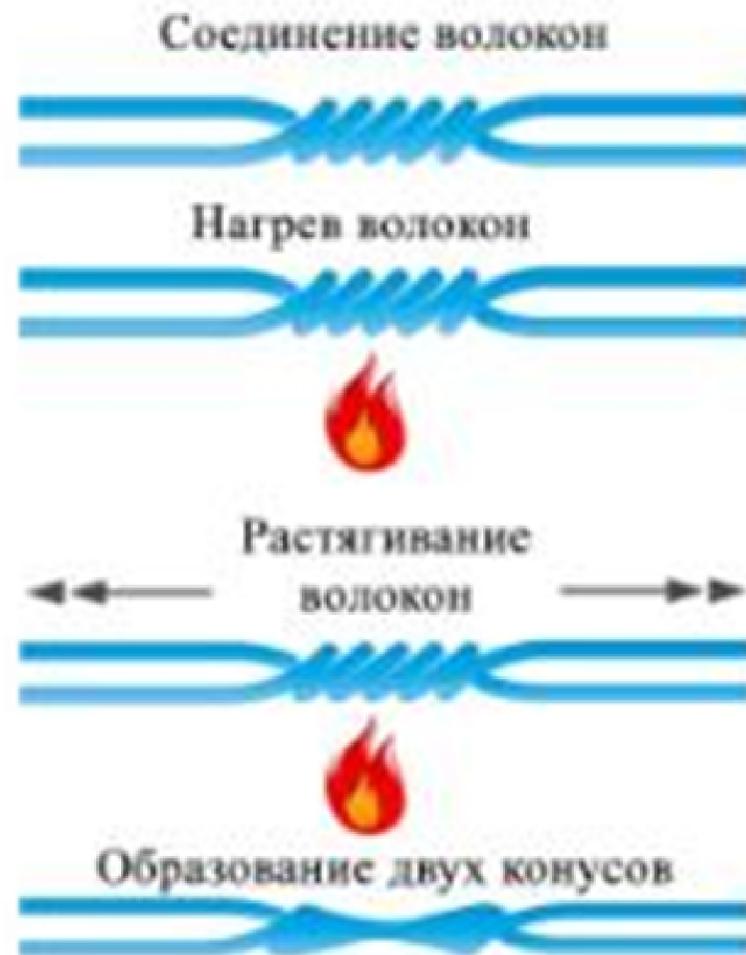
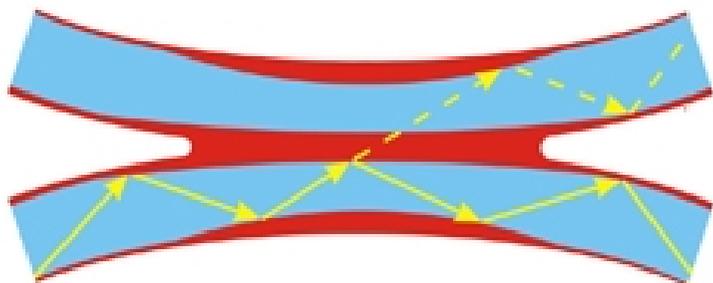
○ Делители и объединители

сплавная (Fused Biconical Taped, FBT)

с торцевым разделением световых потоков,
когда соединяются торцы волокон



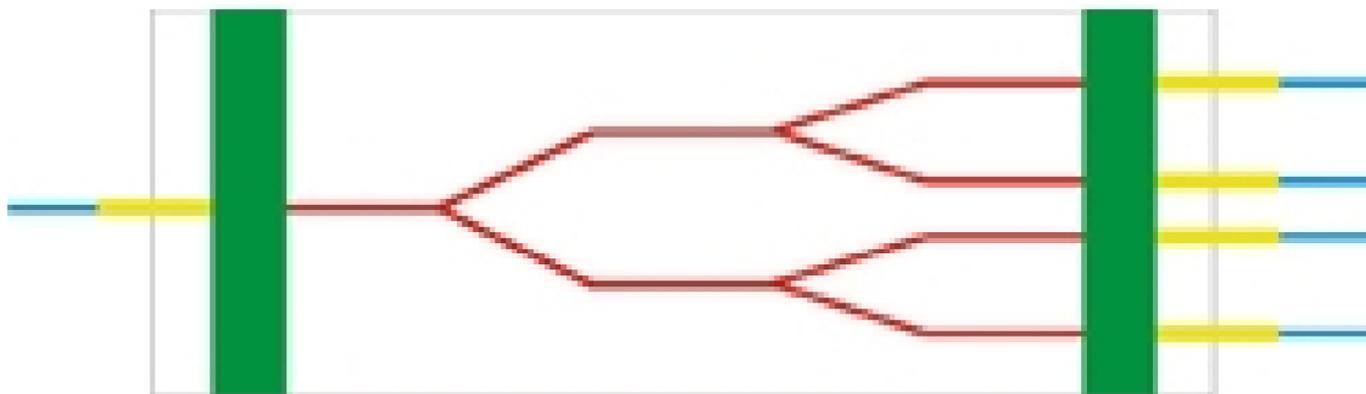
в биконических разветвителях излучение передается через боковую поверхность, которые сплавляются вместе



3. Пассивные волоконно-оптические элементы: деление потока

○ Делители и объединители

планарная (Planar Lightwave Circuit, PLC) – на подложку отражающего слоя-оболочки наносится материал волновода, в нем травлением формируется маска для системы волноводов, система планарных волноводов покрывается вторым отражающим слоем-оболочкой. Необходимое количество разветвлений PLC сплиттера достигается сочетанием делителей 1x2.



оптические делители PLC отличаются высокой стабильностью характеристик в диапазоне длин волн от 1250 до 1650 нм, что позволяет использовать их в решениях с применением технологии CWDM.

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ **Понятие**

формирование волоконно-оптической системы - коммуникационной, информационно-измерительной и других видов, требует широкой возможности по управлению потоками, такое как

выделение сигнала по одному из параметров

модуляция потока по одному из параметров

уменьшение, ограничение световых потоков

– аттенюаторы, фильтры и др.

– изоляторы, циркуляторы и др

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Атенюаторы

аттенюатор «патч-корд» для многомодового и одномодового канала – выполняется в виде волоконно-оптического соединительного шнура на основе специальных волокон с повышенным затуханием;

аттенюаторы с фиксированным вносимым затуханием тип “розетка-розетка” – апертурные аттенюаторы;

FM-аттенюаторы (“коннектор-розетка”) с фиксированным вносимым затуханием предназначены для внесения дополнительного затухания в оптический тракт;



Регулируемые (переменные) оптические аттенюаторы



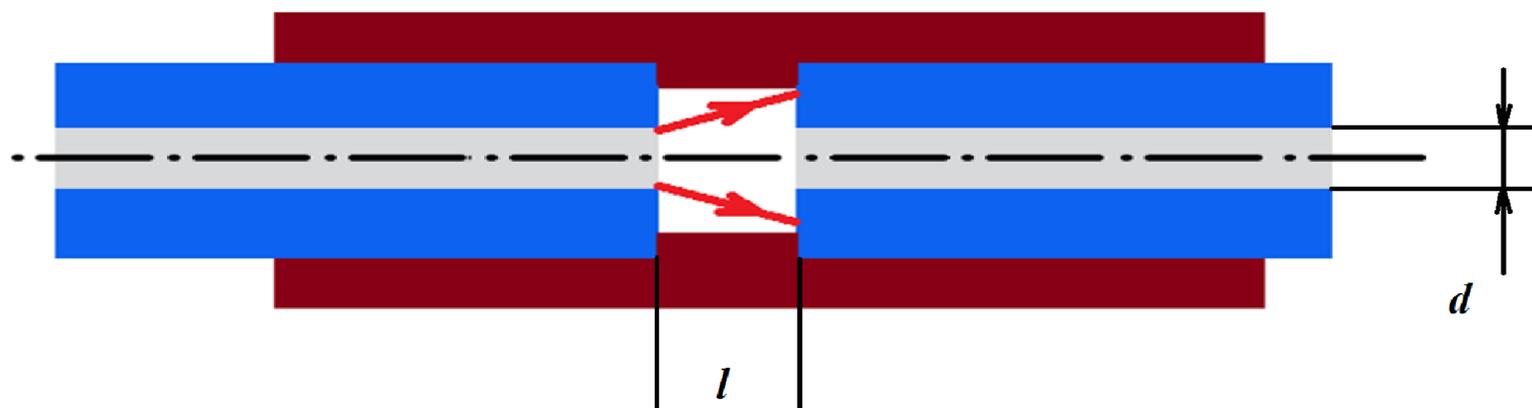
Фиксированные (постоянные) оптические аттенюаторы

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Атенюаторы

принципы построения механических оптических аттенюаторов, путем изменения взаимного положения ВС

$$\alpha_s = 20 \lg \left(1 + 2 \left(l/d \right) \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(NA/n_0 \right) \right] \right)$$



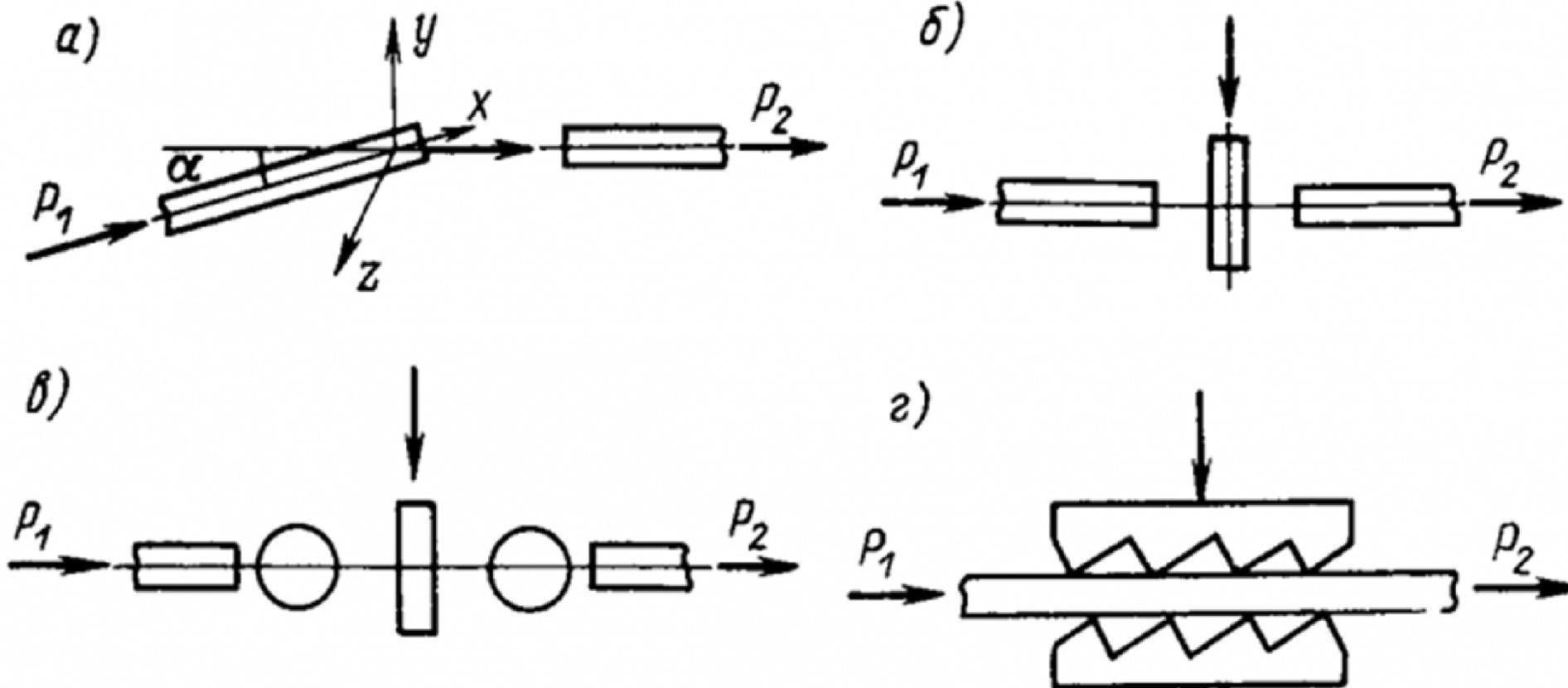
специальная втулка толщиной l создает воздушную прослойку, которая ограничивает расстояние между волокнами при соединении с помощью адаптера

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Атенюаторы: принципы построения механических аттенюаторы

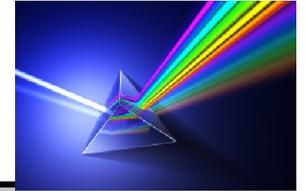
а - изменение взаимного положения ВС; б - ввод фильтра между торцами ВС; в - ввод фильтров между микролинзами; г - изменение затухания за счет микроизгиба ВС

P_1 , P_2 - мощности оптического излучения на входе и на выходе аттенюаторов.



4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

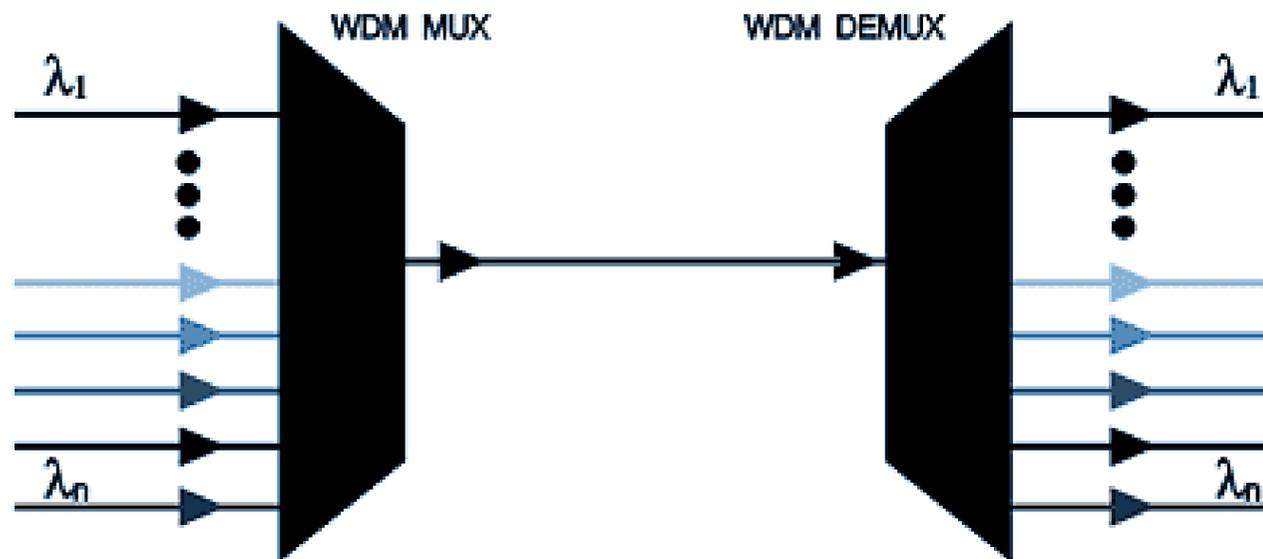
○ **Спектральные устройства**



делители, аттенюаторы, фильтры характеристики которых зависят от длины волны светового потока;

мультиплексоры/демультиплексоры

– устройства типа 1хn, разделяющие проходящий световой поток по длине волны или объединяющие световой поток в один независимо от длины волны при прохождении в обратном направлении



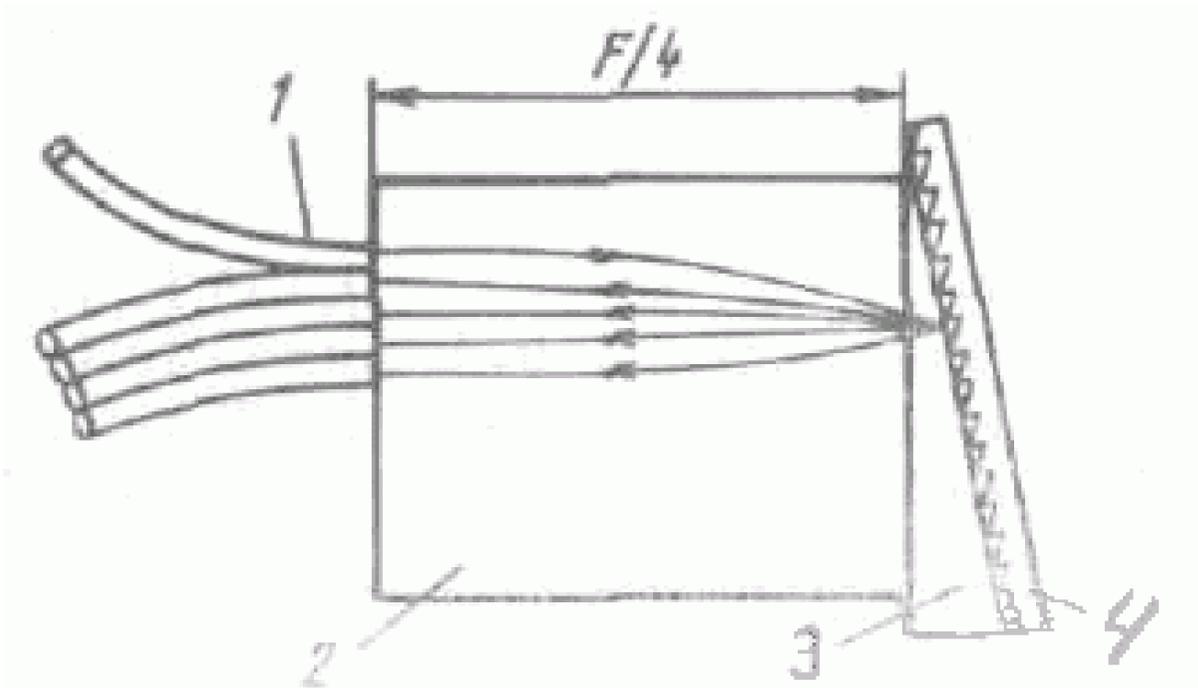
технология изготовления – дифракционная, дисперсная, волновая

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ **Спектральные устройства: мультиплексоры**



деление по фронту на дифракционной решетке

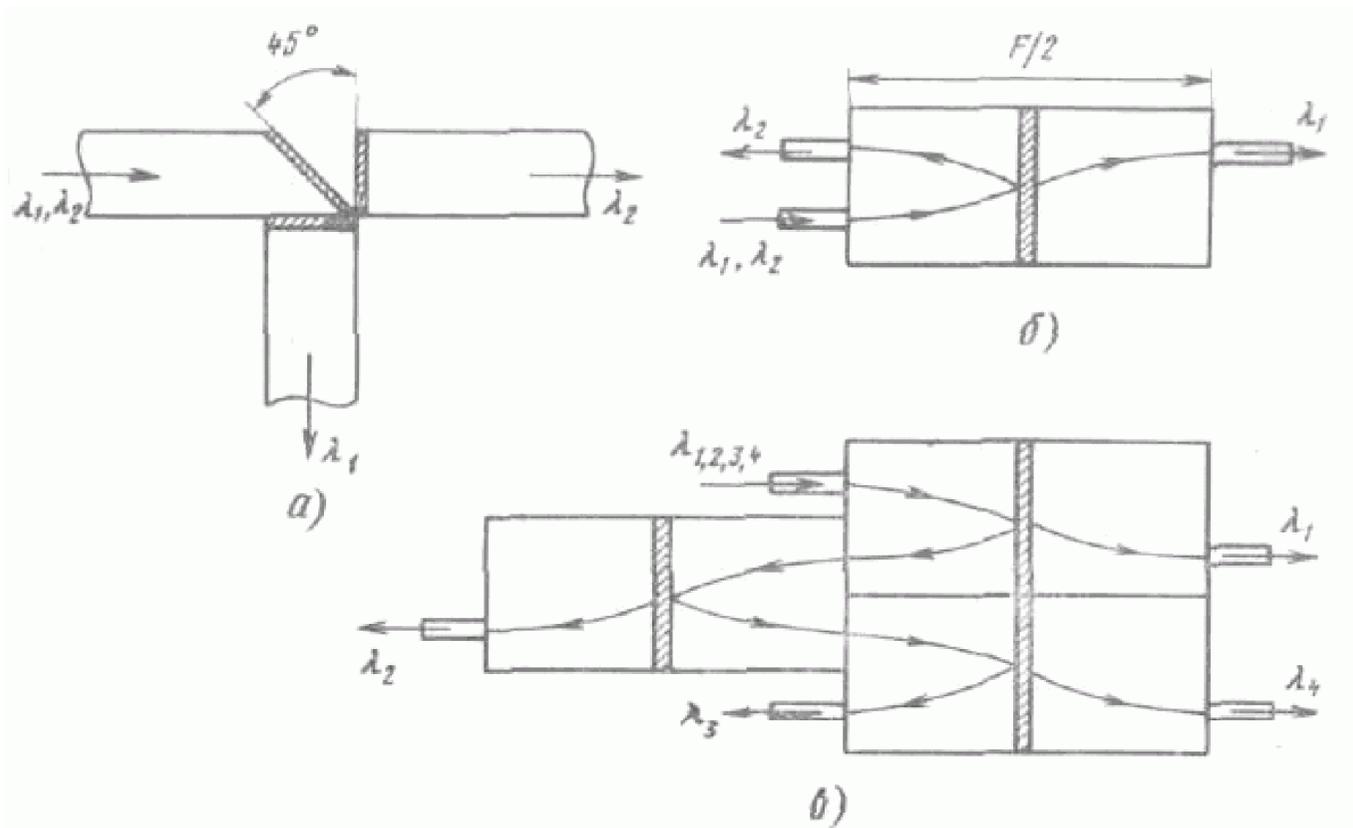


разветвитель на дифракционной решетке с градиентной линзой:

1 — оптические волокна; 2 — цилиндрическая градиентная линза; 3 — призма-вставка; 4 — дифракционная решетка

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Спектральные устройства: мультиплексоры



разветвители на интерференционных фильтрах:

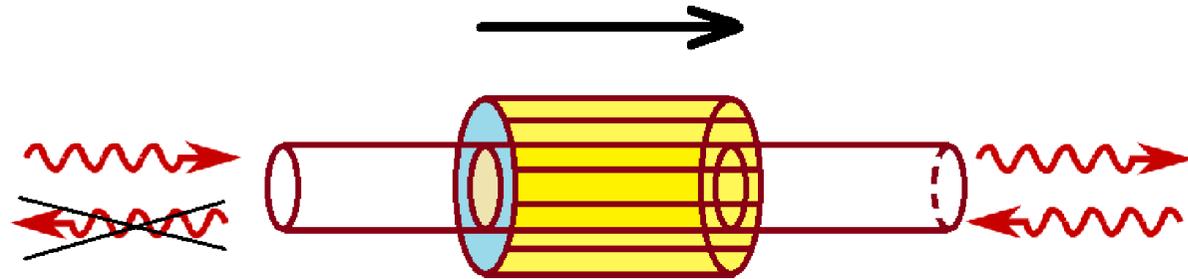
а — конструкция из трех отрезков волокна; б, в — конструкции с градиентными линзами

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

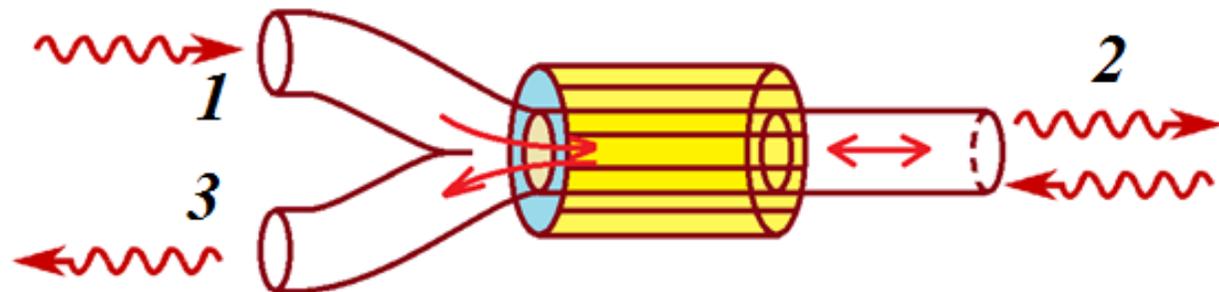
○ Изоляторы и циркуляторы

невзаимные волоконно-оптические устройства, характеристики которых зависят от направления светового потока

изоляторы (оптический диод, фарадеевский элемент) – двухполюсники, пропускающие свет в одном (прямом) направлении и не пропускающие свет в другом (обратном) направлении



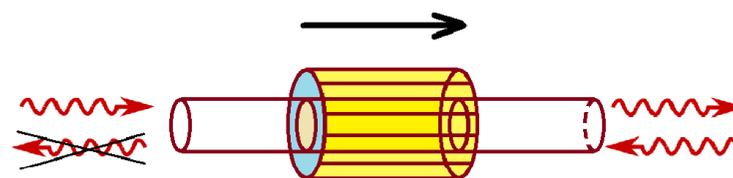
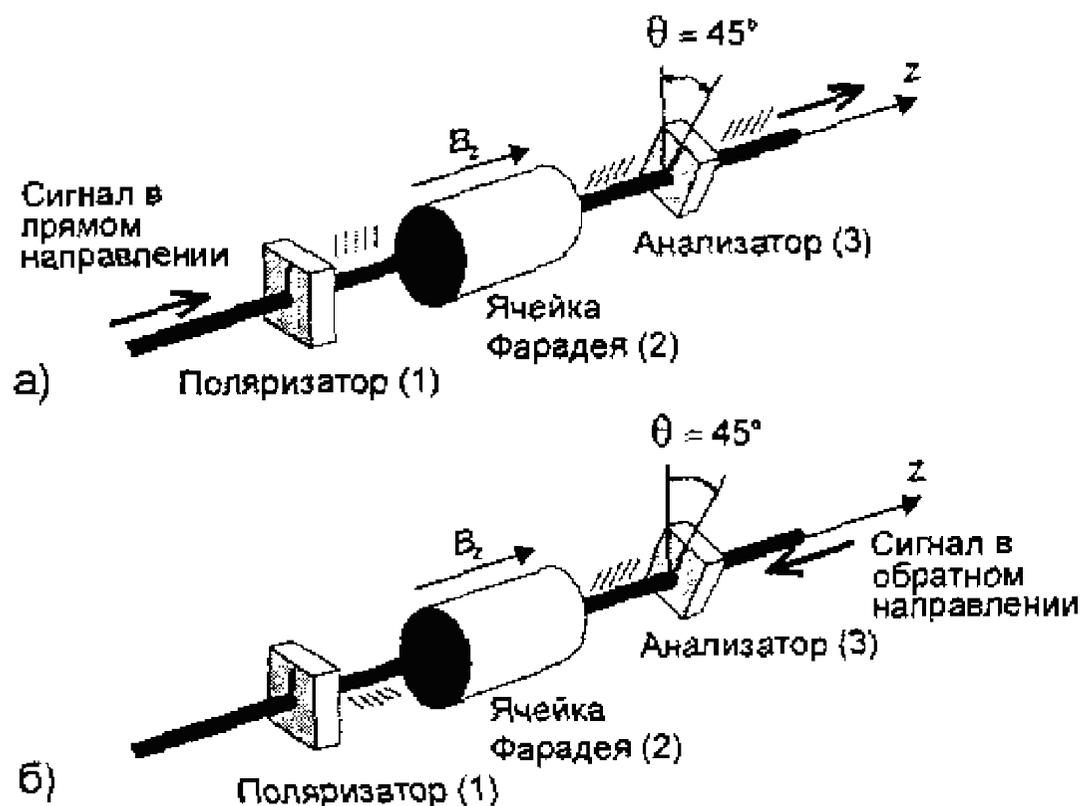
циркуляторы – оптические трехполюсники, которые связывают между собой различные входы и выходы для прямого и обратного направлений светового потока



4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Изоляторы

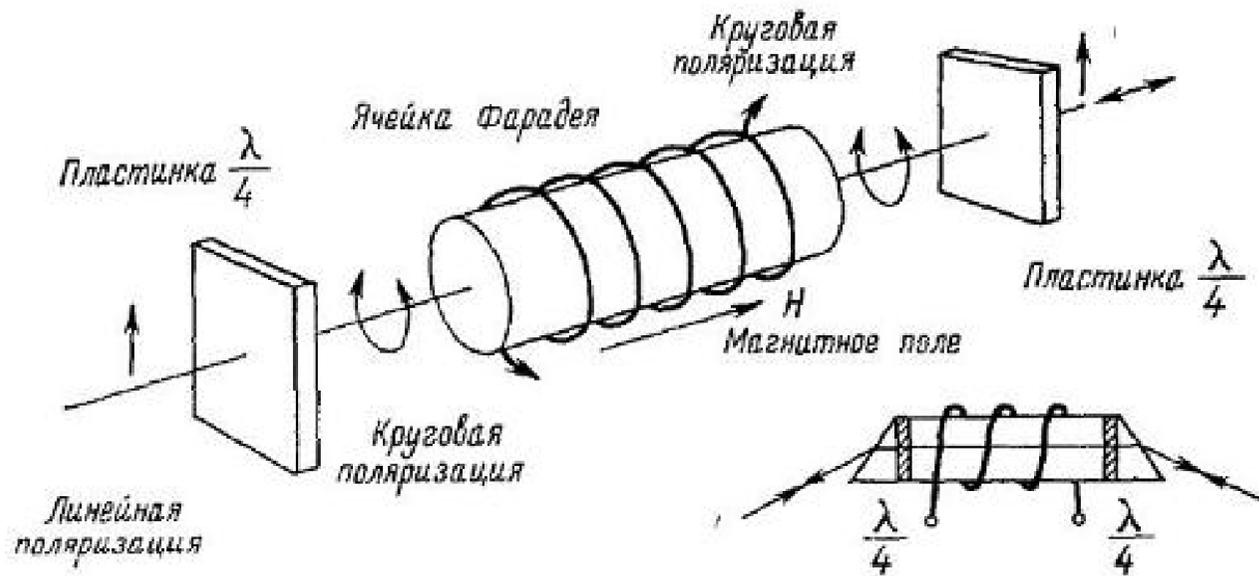
состоит из поляризатора 1 (входного поляризатора), ячейки Фарадея 2 и анализатора 3 (выходного поляризатора); поляризатор повернут на угол 45° относительно анализатора; ячейка Фарадея поворачивает плоскость поляризации света на угол 45° .



4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Невзаимный элемент

создает разные условия для распространения света в прямом и обратном направлениях, например, в показателе преломления для встречных волн

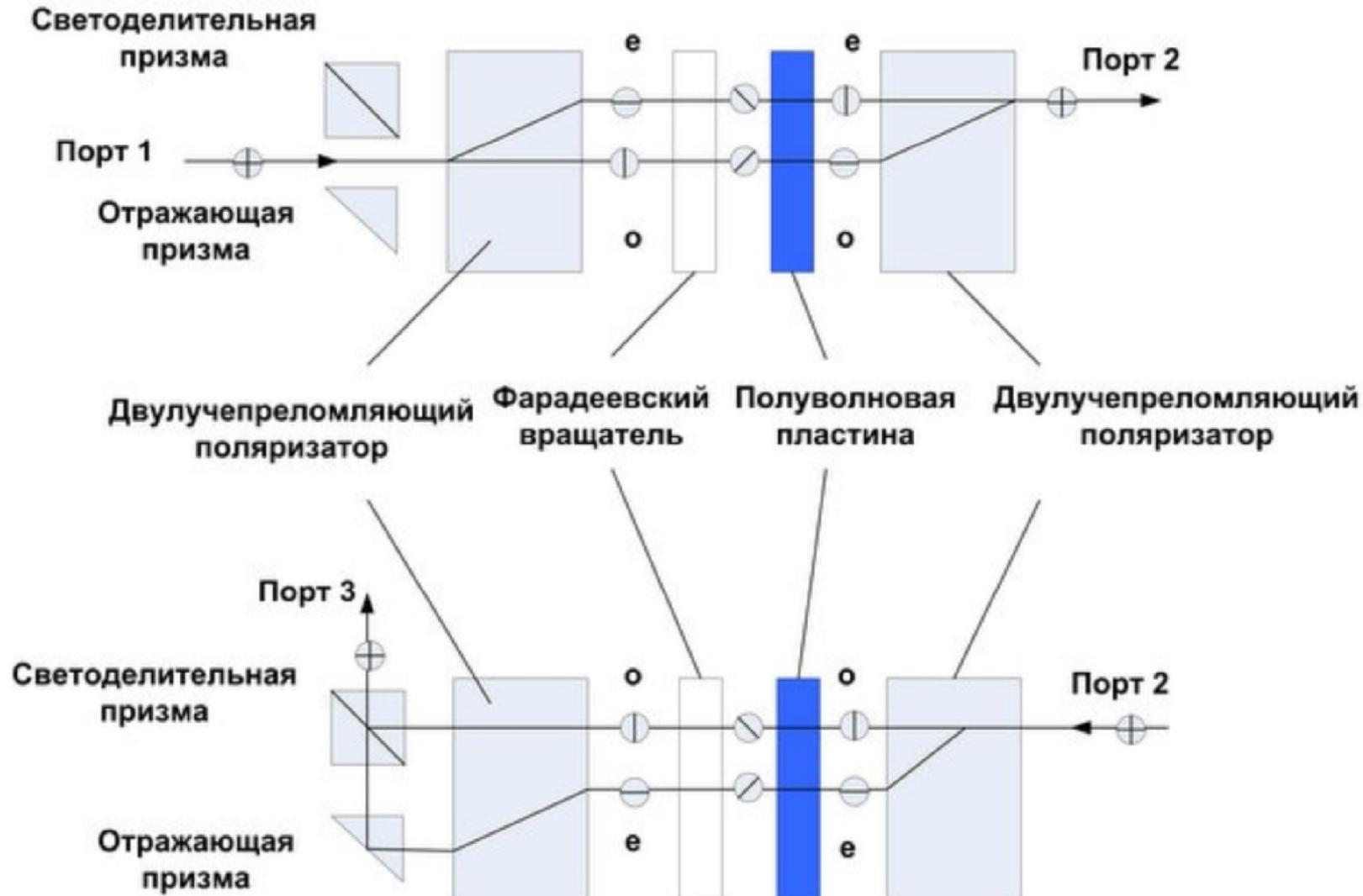
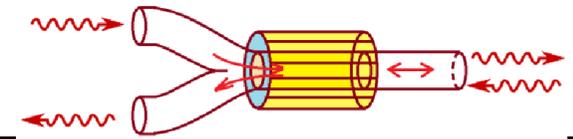


Ячейка Фарадея обычно состоит из пластинки изготовленной из оптически-активной среды и двух четвертьволновых пластинок, ориентированных под прямым углом друг к другу. Линейно-поляризованный свет после прохождения ориентированной определенным образом пластинки приобретает круговую поляризацию, поэтому в пространстве между этими пластинками навстречу друг другу распространяются две волны, поляризованные по кругу в противоположные стороны. Показатели преломления вещества ячейки для волн различной круговой поляризации различаются, что создает невзаимность.

Применяется для формирования невзаимности в кольцевом лазере путем начального сдвига генерируемых частот.

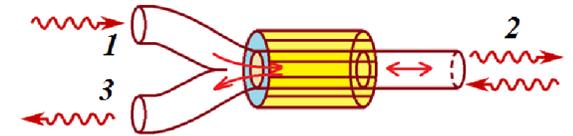
4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Циркуляторы: устройство



4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Циркуляторы

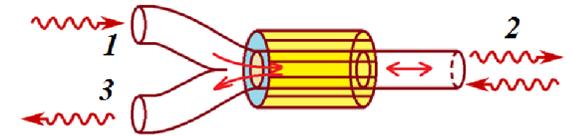


состоит из

- поляризатора с пространственным смещением света (SWP – spacial walk-off polarizer) – это двулучепреломляющий кристалл рутила, в котором входной пучок разделяется на два луча с ортогональной поляризацией (SOP – state of polarization, состояние поляризации) – обыкновенный (о-луч) и необыкновенный (е-луч), на выходе е-луч и о-луч смещены друг относительно друга;
- Фарадеевский вращатель (Faraday rotator) поворачивает плоскость поляризации на угол $+45$ градусов **вне зависимости** от направления распространения света;
- полуволновая пластина (half-wave plate) поворачивает плоскость поляризации на угол $+45$ или -45 градусов **в зависимости** от направления распространения света.

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Циркуляторы: характеристики



вносимые в прямой канал потери $A_{12} = -10 \lg P_2/P_1$ (где P_1 - мощность на входе 1, P_2 - мощность на выходе 2), определяются суммарным значением потерь коллимирующей системы (включая абберационные потери линз), потерь в оптических элементах (поглощение, рассеяние и френелевское отражение), отклонением угла фарадеевского вращения от 45° и потерь, связанных с неточностью установки элементов. В зависимости от качества элементов и точности юстировки величина вносимых потерь в прямом канале может составлять $A_{12} \sim 0,8...1,6$ дБ.

потери в отраженном канале $A_{23} = -10 \lg P_3/P_2$ практически лежат в том же интервале, поскольку поворотная призма 4 и дополнительный рутиловый элемент 9 обладают малыми потерями.

изоляция порта 1 от порта 2, т. е. потери $A_{21} = -10 \lg P_1/P_2$ так же как и в случае оптического изолятора, определяются степенью разведения поляризованных лучей в двулучепреломляющих элементах, угловой ошибкой при взаимной ориентации этих элементов, отражением и рассеянием излучения в фарадеевском вращателе, а также ошибками при юстировке элементов. Экспериментально установлено, что рассеяние на различных дефектах в кристаллах рутила и граната ограничивает максимальную величину изоляции на уровне 40...45 дБ.

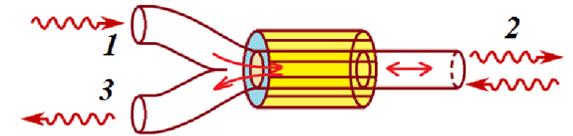
перекрестные помехи на ближнем конце $A_{13} = -10 \lg P_3/P_1$, связаны с отсутствием непосредственной связи между портами 1 и 3, поэтому величина перекрестной помехи определяется только френелевскими отражениями от торцов первого рутилового элемента и фарадеевского вращателя и может быть снижена до уровня менее - 50 дБ.

обратные отражения A_{11} , A_{22} , A_{33} также определяются величиной коэффициента отражения от горцев волокон и от граней элементов. Наклон торцов волокон примерно на 7 градусов и граней элементов примерно на 1 градус приводит к снижению обратных отражений до уровня 55...-60 дБ.

На основе предложенных структур изготавливаются и предлагаются потребителям одномодовые поляризационно-независимые ОЦ для диапазонов длин волн 1,3 и 1,55 мкм.

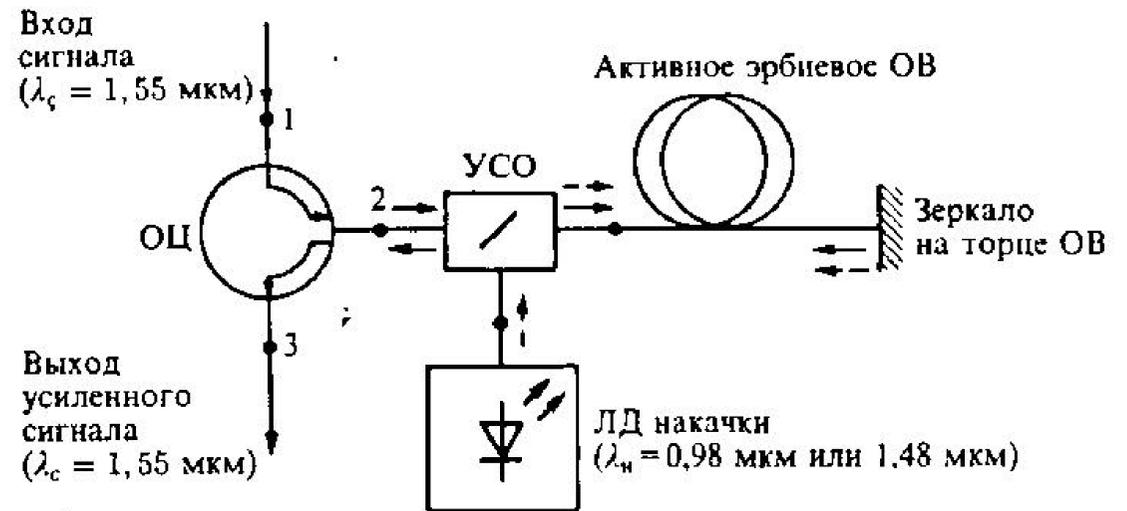
4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Циркуляторы: применение

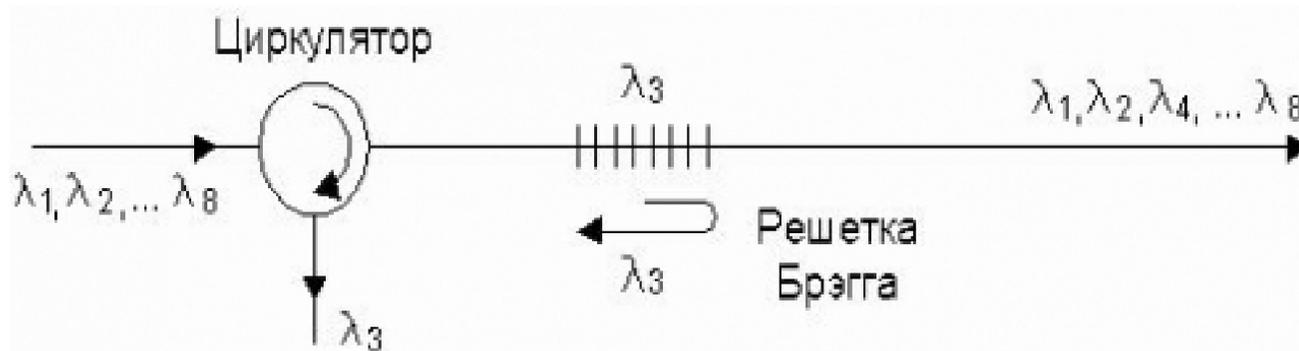


— в волоконно-оптическом усилителе отражательного типа

эффективность действия накачки в активном эрбиевом волокне увеличивается в два раза.



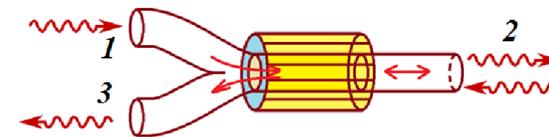
— для построения мультиплексоров CWDM-DWDM по схеме:



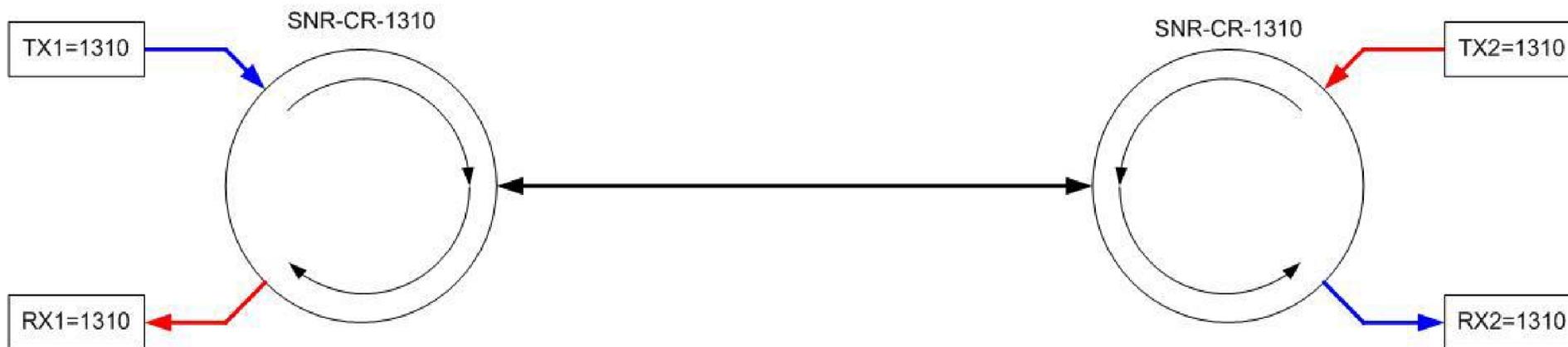
данное использование ОЦ устарело, системы волнового уплотнения строятся по технологии тонких пленок, что позволило резко (примерно на порядок) уменьшить их стоимость.

4. Пассивные волоконно-оптические элементы: управление потоком

○ Циркуляторы: применение



в измерительных системах, в частности, в рефлектометрах, путем замены традиционного трехдецибельного направленного ответвителя (оптического делителя) на ОЦ позволяет увеличить динамический диапазон примерно на 6 дБ, т. е. увеличить дальность действия прибора на 10-15 км в диапазоне 1550 нм.

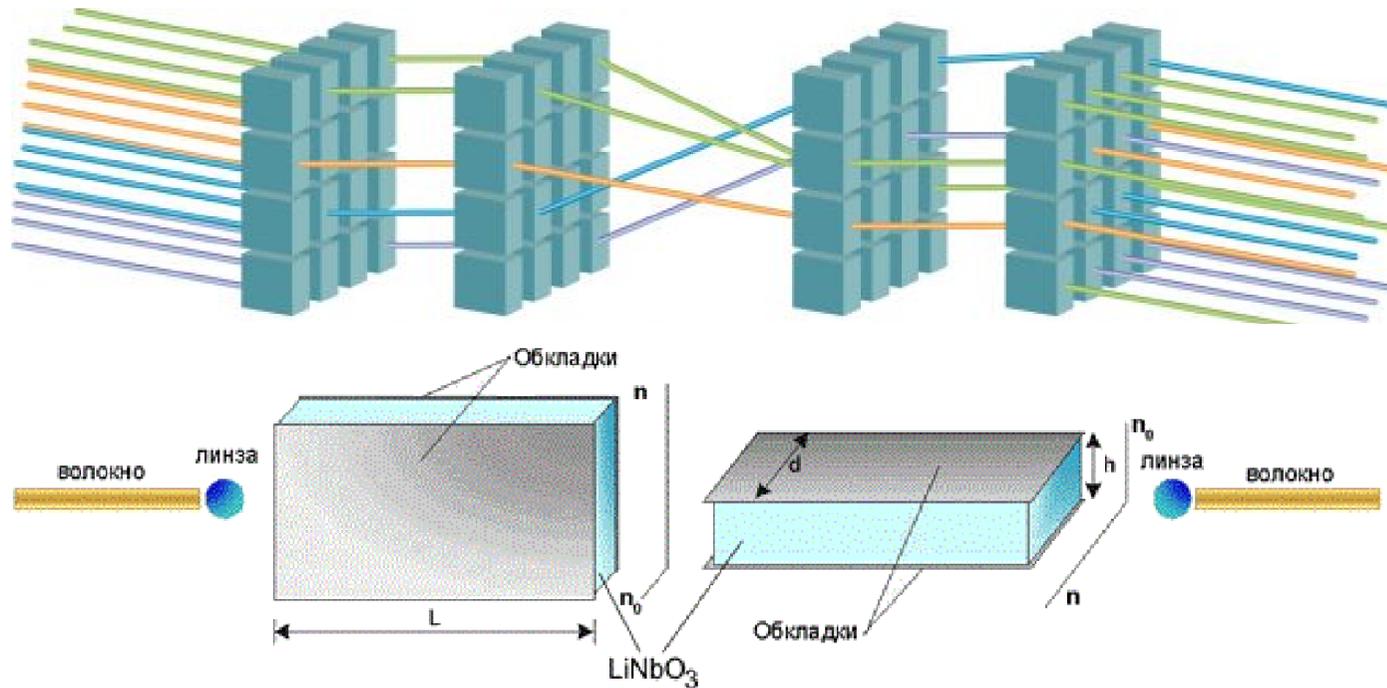


наиболее широкое применение ОЦ сейчас находят в качестве элементов волоконно-оптического тракта для обеспечения одновременной двунаправленной передачи по одному оптическому волокну (реализация дуплексной связи).

5. Активные волоконно-оптические элементы

○ Устройства управления

переключатели, коммутаторы, модуляторы, дефлекторы



изготовление по технологиям

на основе акустооптических эффектов

на основе технологии MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems)

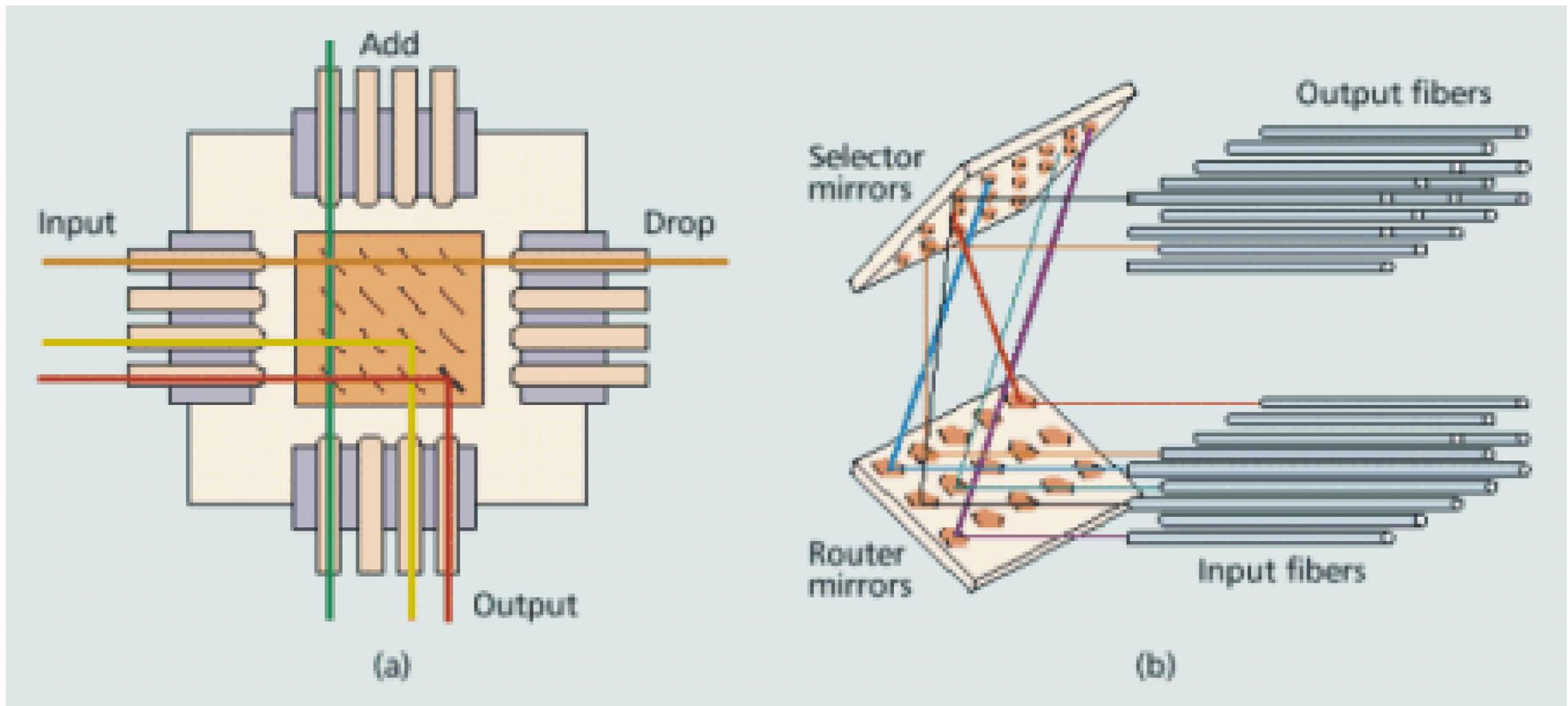
на основе магнитооптических и электрооптических эффектов

5. Активные волоконно-оптические элементы

○ Устройства управления

переключатели, коммутаторы

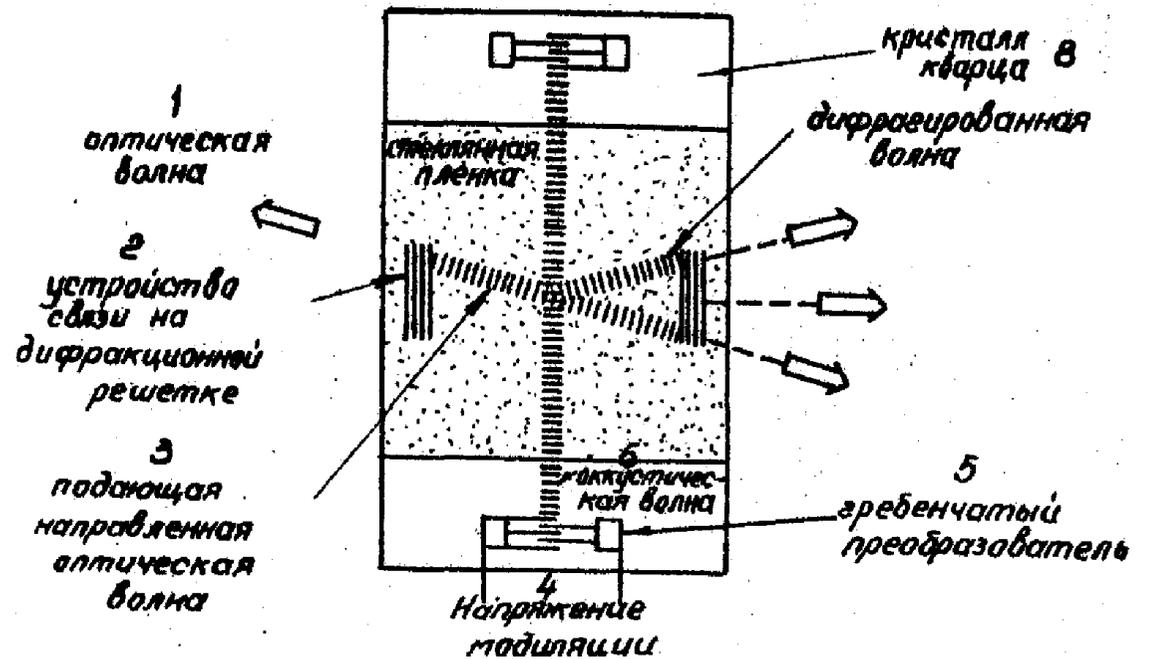
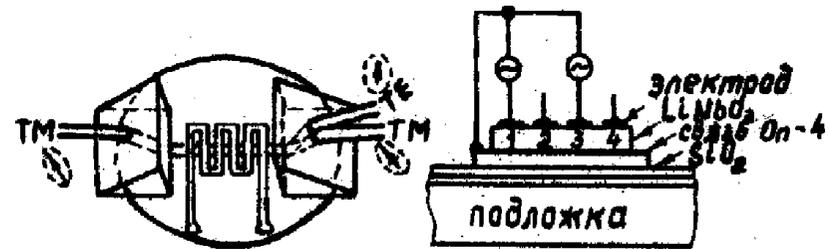
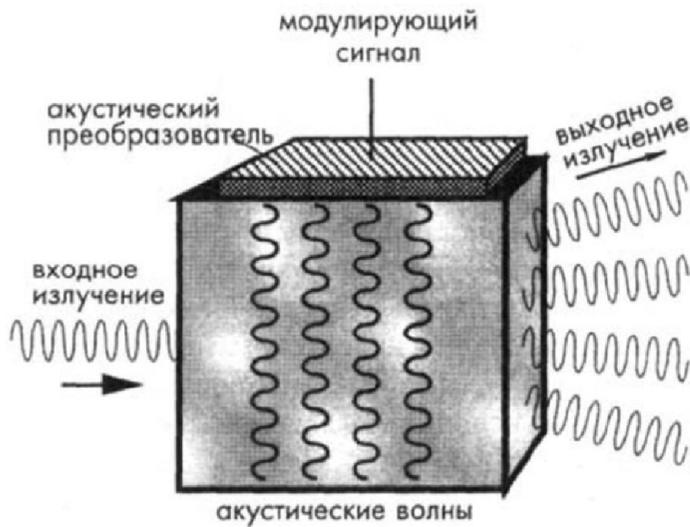
на основе технологии MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems)



5. Активные волоконно-оптические элементы

○ Устройства управления

переключатели, коммутаторы
на основе акустооптических эффектов



6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ **Понятие**

основной активной аппаратурой волоконно-оптических технологий являются

- лазеры (на основе волоконных технологий): позволяющие создавать широкий спектр источников света высокой мощности, спектрального состава и др. для исследовательских целей, технологических применений, связи;
- усилители (на основе волоконно-оптических технологий): устройства для осуществления передачи информации на большие расстояния;

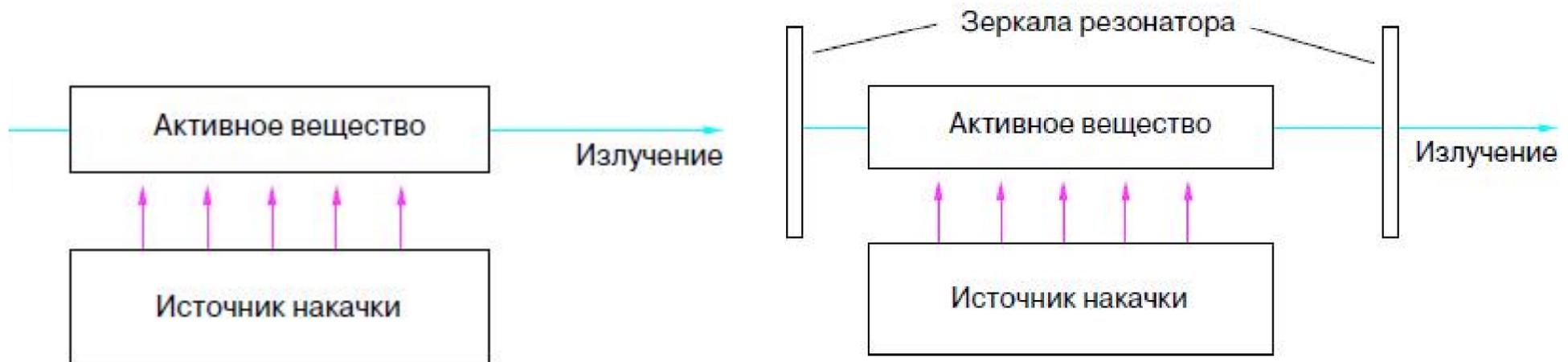
преимущества использования волоконно-оптических технологий для создания усилителей и лазеров заключается в интеграции с другими волоконно-оптическими устройствами, возможностью достижения лучших параметров

6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Понятие

основные элементы усилителя и лазера

- активное вещество, являющееся инверсной средой, т.е. средой в структуру которого введены молекулы, отдельные атомы с большим временем жизни электронов в возбужденном состоянии по сравнению с основной частью – оптическое волокно легированное добавками Er^{+3} , Tl^{+3} и др.;
- накачка, источник энергии для возбуждения электронов в атомах – светодиоды с волоконно-оптическим выходом;
- зеркала, формирующие обратные излучения – решетки Брэгга;

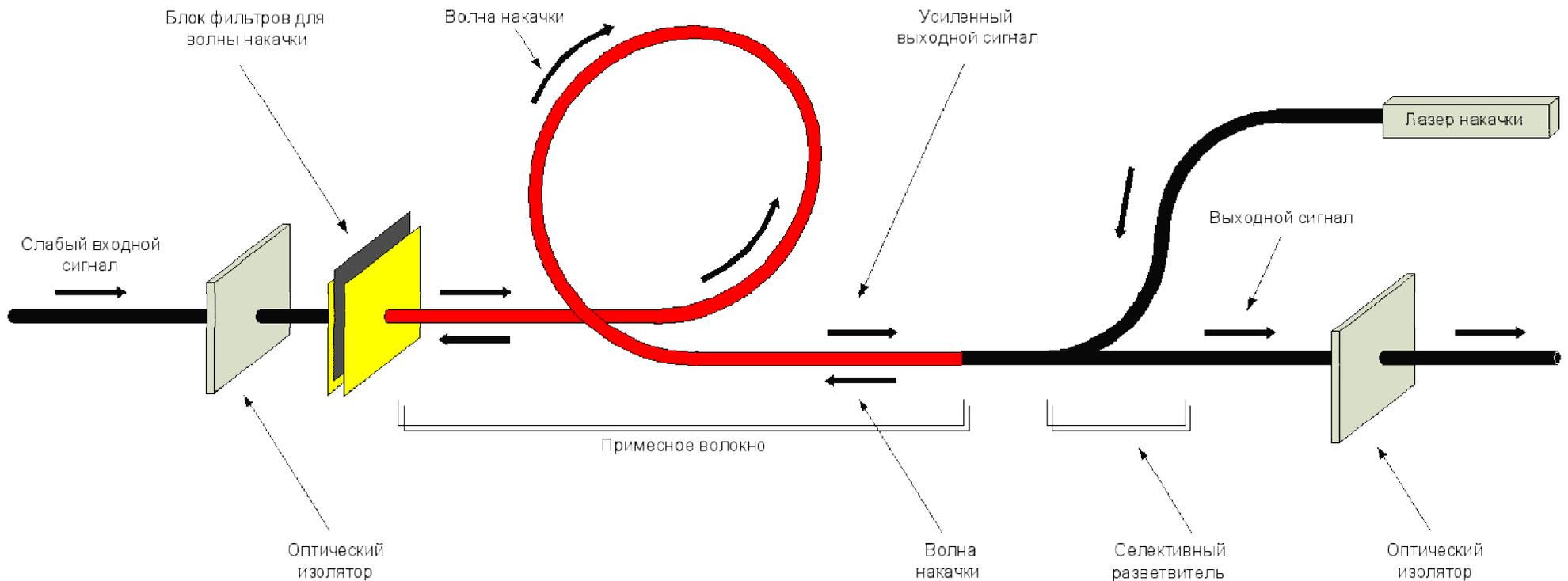


6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Волоконно-оптический усилитель

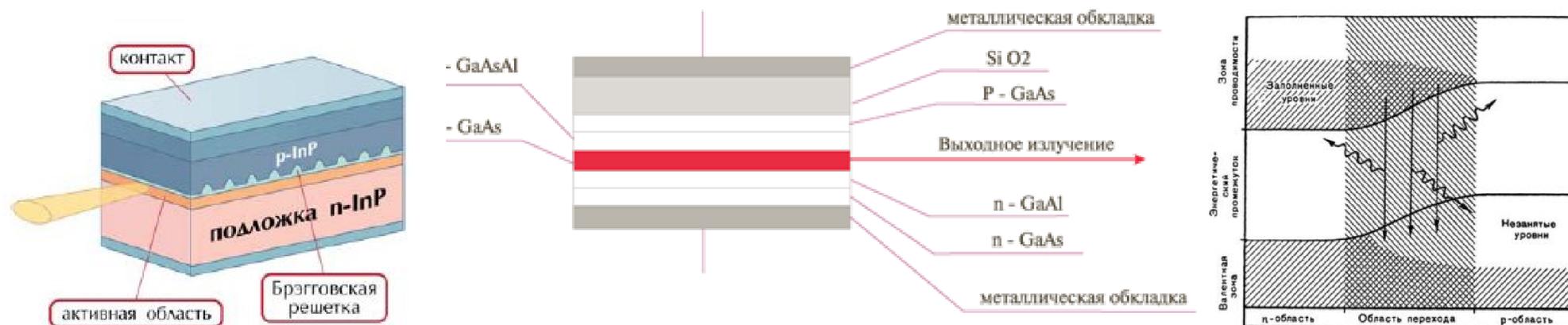
на оптическом волокне активированном ионами эрбия Er^{+3} , тулия Tl^{+3}

конструкция



6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Волоконно-оптический усилитель на полупроводниковом усилителе

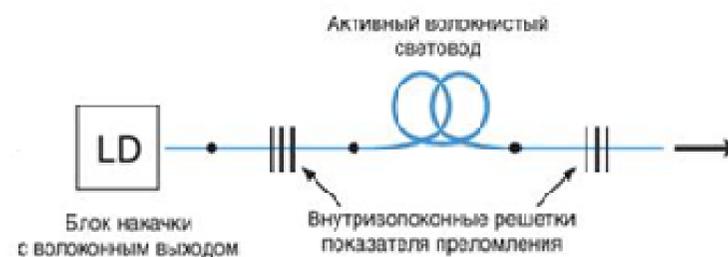
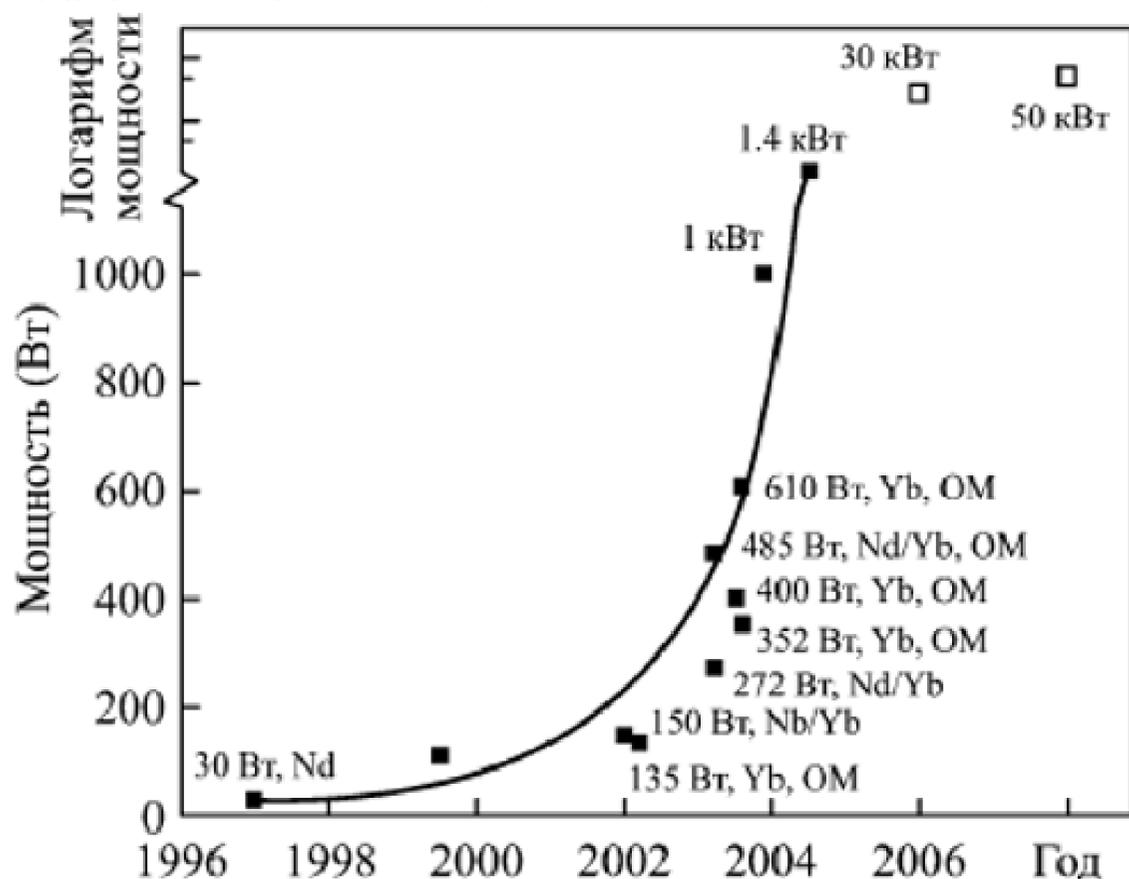


6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Волоконный лазер



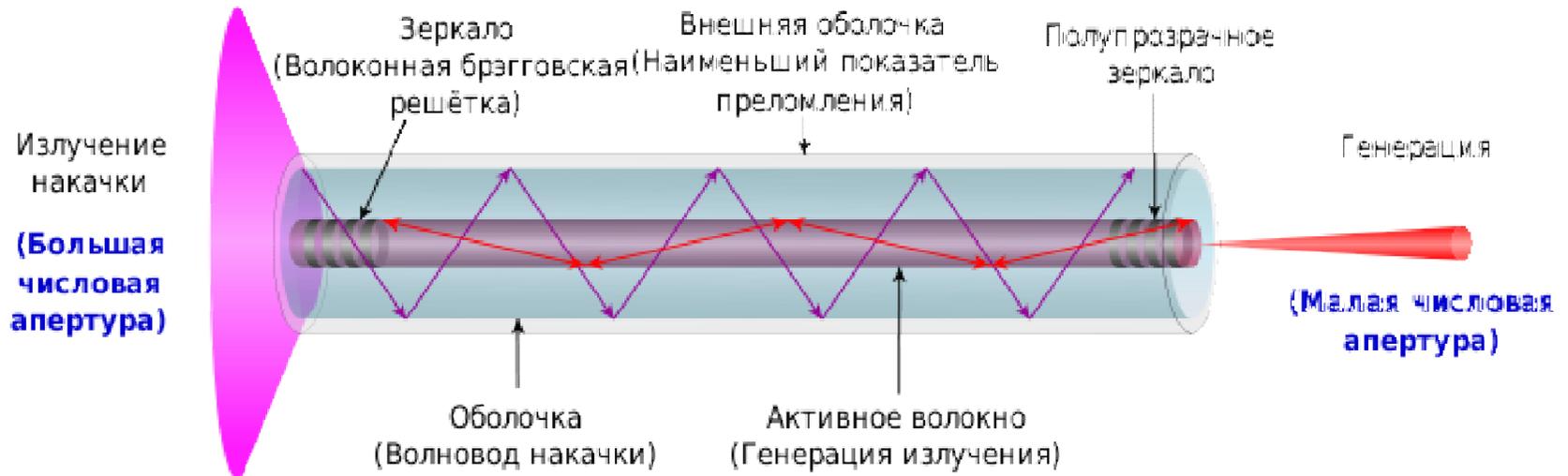
генератор когерентного излучения с активной средой из активированного оптического волокна с резонатором из на основе брэгговских решеток или других отражающих волоконно-оптических элементов.



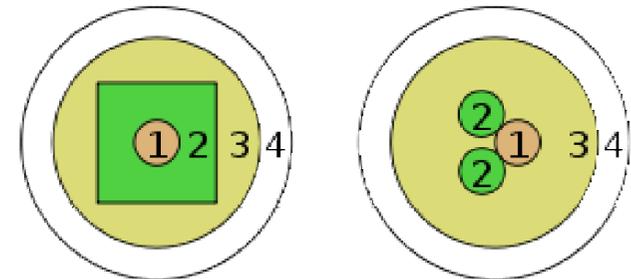
Промышленные волоконные Yb-лазеры серии ЛС

6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Лазер



1. Сердцевина, легированная редкоземельными ионами.
2. Волновод накачки.
3. Общая оболочка.
4. Защитная оболочка



Условная схема двух типов оптических волокон для волоконных лазеров

Слева: обычная схема с одним волноводом накачки, волокно с двойным покрытием.

Справа: схема технологии GTWave с двумя волноводами накачки (для примера).

6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Волоконные генераторы суперконтинуума – белый лазер

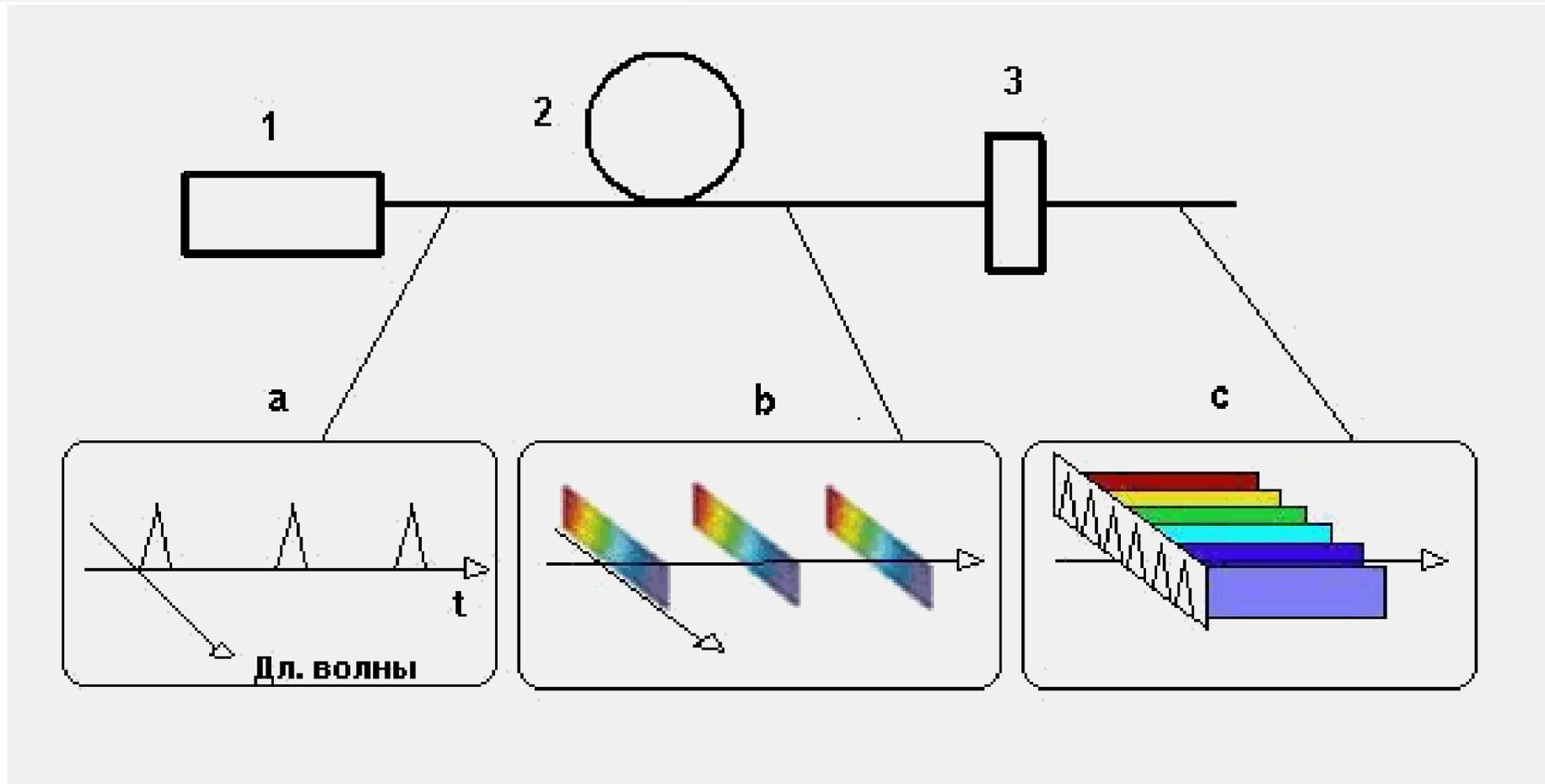
Суперконтинуум - когерентное излучение с ультра-широким спектром, который перекрывает одну и более октав оптического спектра (октава спектра - диапазон от длины волны до её удвоенного значения, например от 400 до 800 нм и т.д.). Суперконтинуум генерируется под действием мощных лазерных импульсов или при накачке мощным непрерывным излучением в различных средах, наиболее эффективно для получения суперконтинуума применяются оптические волокна с высокой нелинейностью.

Фемтосекундный лазер - лазер, генерирующий ультракороткие световые импульсы, как правило, с высокой частотой повторения в диапазоне 1 МГц - 3 ГГц. Фемтосекундные импульсы длительностью десятки и сотни фемтосекунд могут генерироваться как твердотельными и волоконными лазерами, так и их гибридами - волоконно-дискретными лазерами. В силу относительно высокой пиковой мощности фемтосекундных световых импульсов они достаточно легко спектрально преобразуются методами нелинейной оптики (параметрическая генерация, генерация второй гармоники и т.д.).

Нелинейный кристалл – оптический кристалл, в котором возможно нелинейное преобразование длины волны излучения – генерация второй и третьей гармоник, генерация суммарной и разностной частот. Такое преобразование возможно в силу нелинейного отклика атомного осциллятора на сильное световое поле – ангармоничность атомного осциллятора приводит к появлению поляризации среды, изменяющейся на отличных от падающей волны (или волн) частотах. Перекачка энергии от падающей волны (или волн) к волнам на других частотах (гармоник или волн с суммарной/разностной частотой) наиболее оптимальна тогда, когда равны фазовые скорости взаимодействующих волн. В этом случае говорят о выполнении условия фазового синхронизма.

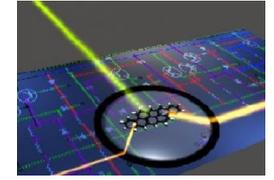
6. Волоконно-оптические усилители и лазеры

○ Волоконные генераторы суперконтинуума



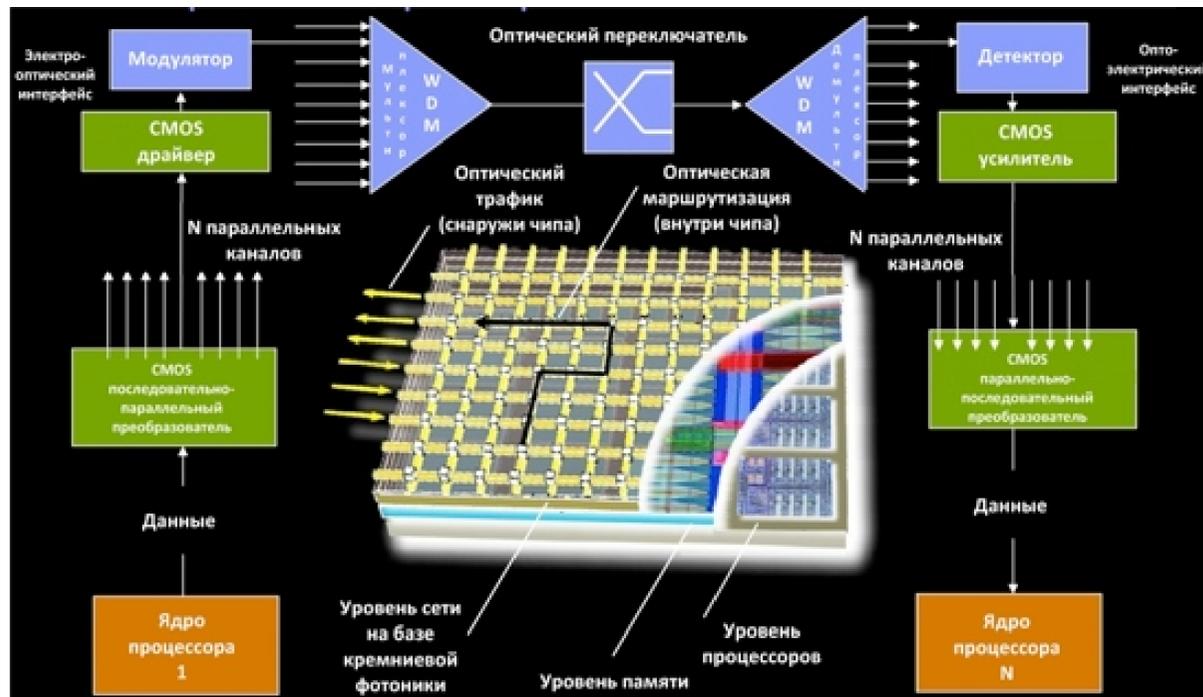
1 – мощный фемтосекундный лазер, 2 – волокно с высокой нелинейностью (микро структурированное волокно), 3 – перестраиваемый многополосный оптический фильтр: a,b,c – спектральный состав излучения

7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства



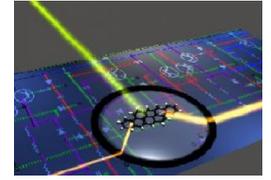
○ Понятие

(integrated optical device, photonic integrated circuit) многокомпонентное фотонное устройство, изготовленное на единой подложке (монокристаллы) или на нескольких подложках (гибридные) и выполняющее функции обработки оптических сигналов, в качестве материала для подложки используются соединения $A^{III}B^V$ с примесями, или на подложке из ниобата лития, кремния, стекла, реже — на подложке из полимеров.



7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства

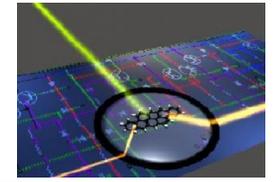
○ **Спектральные устройства**



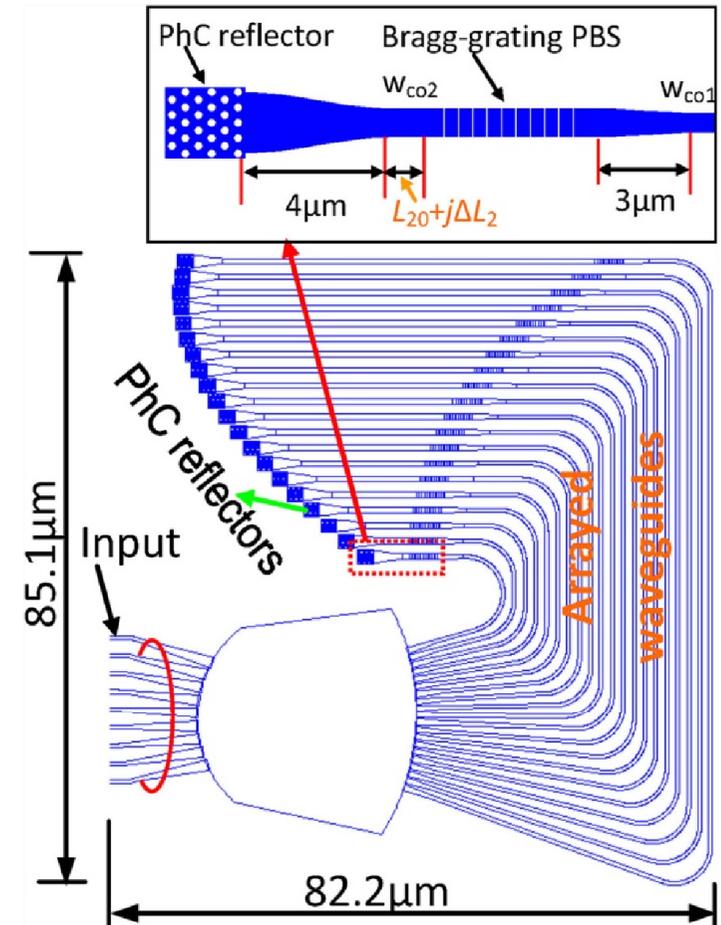
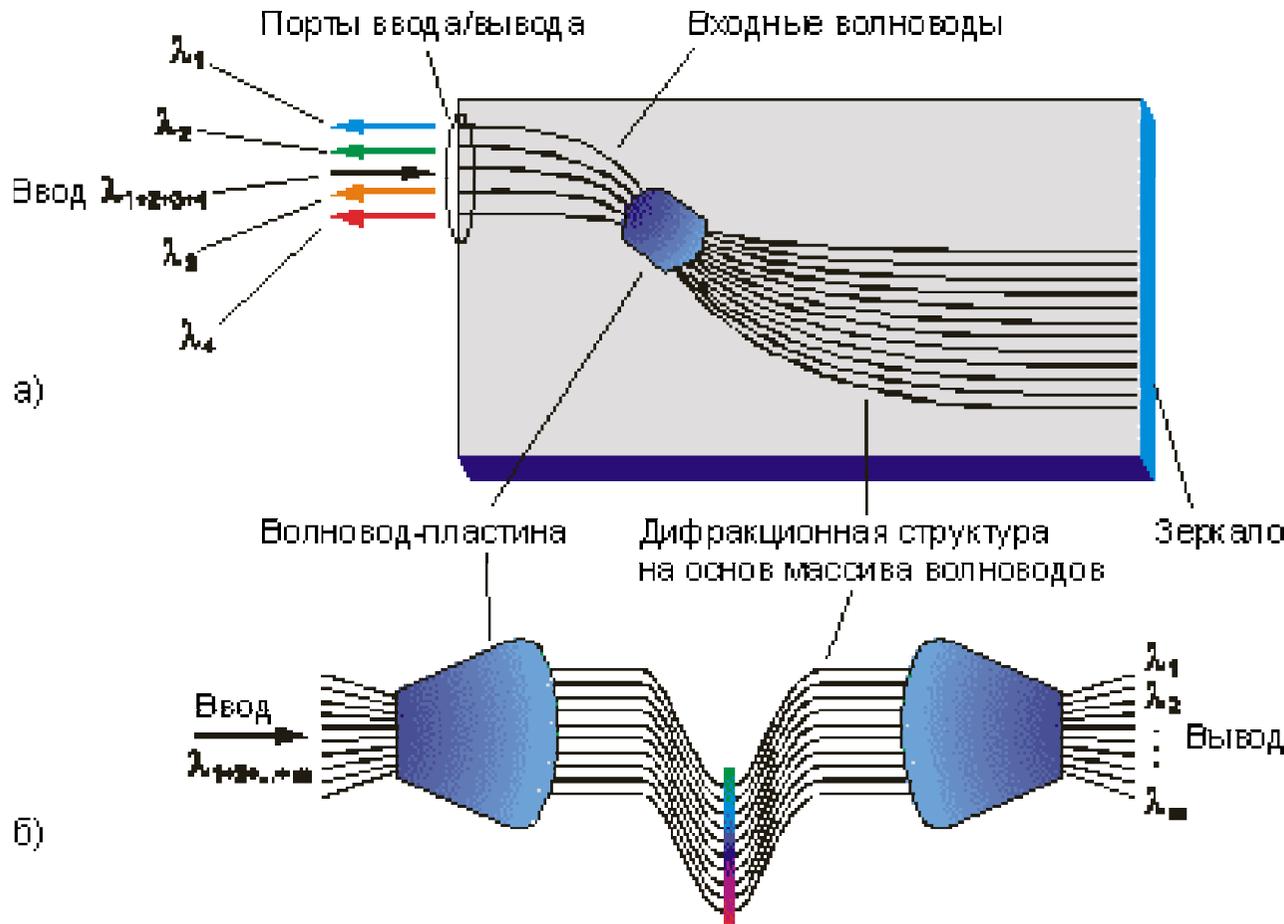
решетка на основе массива волноводов (arrayed waveguide grating, AWG) - интегральный оптический компонент, представляющий дифракционную решетку на поверхности или в объеме оптического планарного оптического волновода и выполняющий функции оптического мультиплексора/демультиплексора; для разделение каналов основано на возникновении разности фаз для различных длин волн сигнала на входе и выходе.



7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства



○ Спектральные устройства

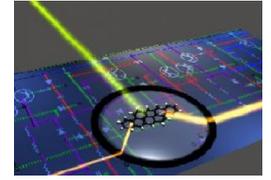


схемы DWDM мультиплексоров:

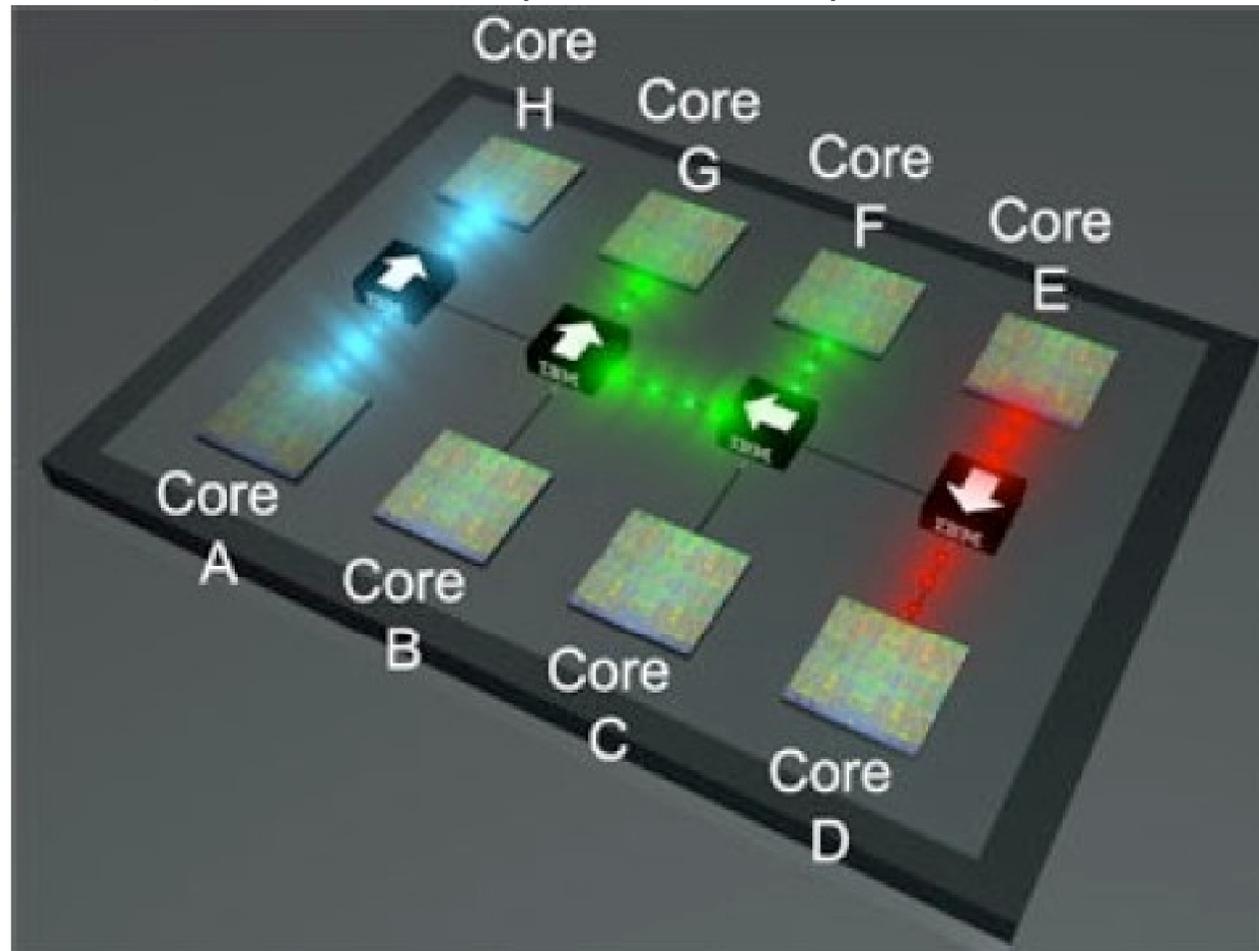
а) с отражающим элементом; б) с двумя волноводами-пластинами

7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства

○ Кремневая фотоника (перспективные разработки)



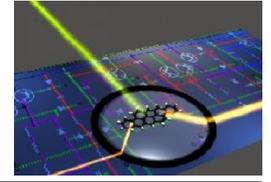
межядерная коммуникация на основе кремниевой фотоники



лаборатория
IBM Research:

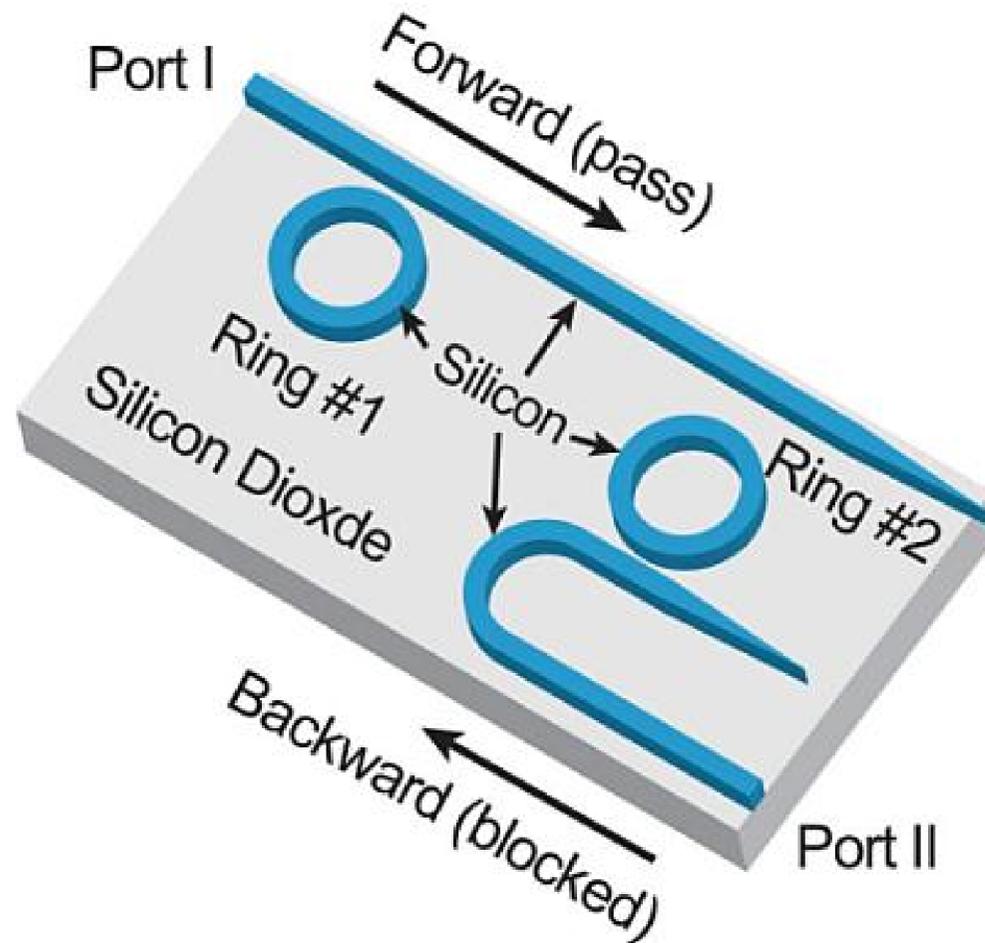
коммуникационный интерфейс в высокоскоростных шинах, соединяющих ядра многоядерного процессора

7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства

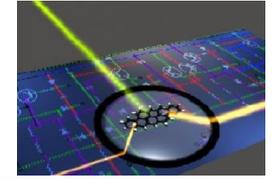


○ Оптический диод (перспективный)

«пассивный оптический диод» состоит из двух крошечных кремниевых колец, размер которых приблизительно равен 10 микронам в диаметре

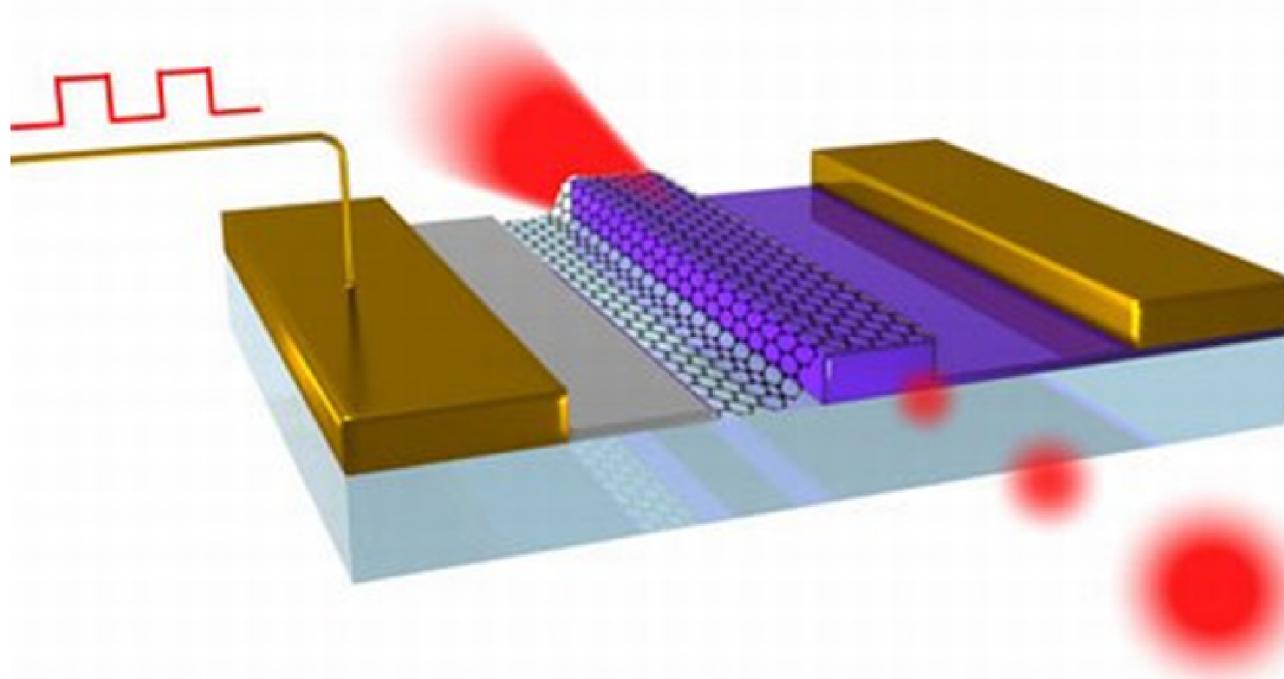


7. Интегрально-оптические (фотонные) устройства



○ Оптический модулятор (перспективный)

модуляция светового потока на частоте 500 ГГц проводилась электрическим потенциалом, с помощью которого производилось влияние на энергетические уровни электронов, уровень Ферми в графене.



Графен в обычном состоянии практически непрозрачен для световых волн большей части инфракрасного диапазона из-за того, что электроны материала поглощают большинство фотонов падающего светового потока. Подача на графен отрицательного электрического потенциала заставляет электроны материала покинуть его пределы, сделав графен почти прозрачным для инфракрасного света. Приложенный положительный потенциал переводит электроны на самый высокий энергетический уровень, туда, где они становятся уже не в состоянии поглощать фотоны, что делает графен так же прозрачным для света. Таким образом, подача и отключение напряжения на графеновой пленке позволяет заблокировать или разрешить прохождение сквозь него инфракрасного света, модулируя таким образом падающий луч.

<http://www.dailytechinfo.org/electronics/2397-na-osnove-grafena-sozdano-novoe-ustrojstvo-sposobnoe-yeffektivno-modulirovat-potok-sveta.html>

8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

○ **Понятие**

Волоконно-оптические тестеры

Волоконно-оптические анализаторы спектра

Волоконно-оптические анализаторы поляризационной дисперсии

Индикаторные диаграммы контроля цифровых линий связи

Оптический рефлектометр

8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

○ Волоконно-оптический тестер

устройство контроля параметров волоконно-оптического кабеля путем измерения затухания, обратных потерь, включающее калиброванный источник излучения и измеритель оптической мощности:

характерные параметры

(на примере FOT-920)

динамический диапазон при измерении оптической мощности = 60 дБ

динамический диапазон при измерении обратных потерь = 65 дБ

источник:

LED 850±30 нм, 1310±25 нм >-20 дБм

Laser 1310±25 нм, 1550±25 нм >-5 дБм

приемник:

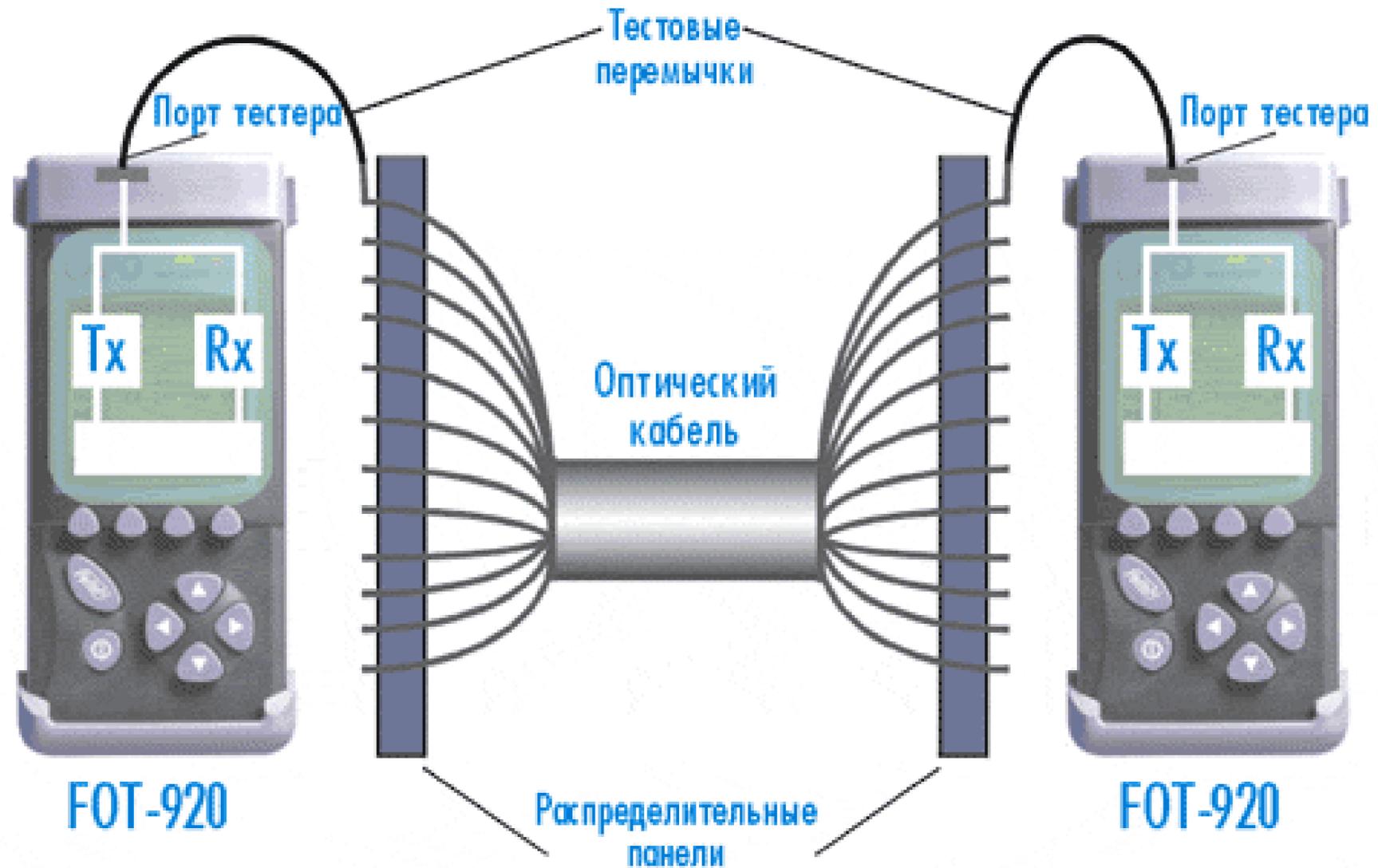
чувствительность +10/-68 дБм (Ge), +25/-60 дБм (GeX) и +4/-70 дБм (InGaAs)

точность измерений с разрешением = 0,01 дБ



8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

○ Волоконно-оптический тестер

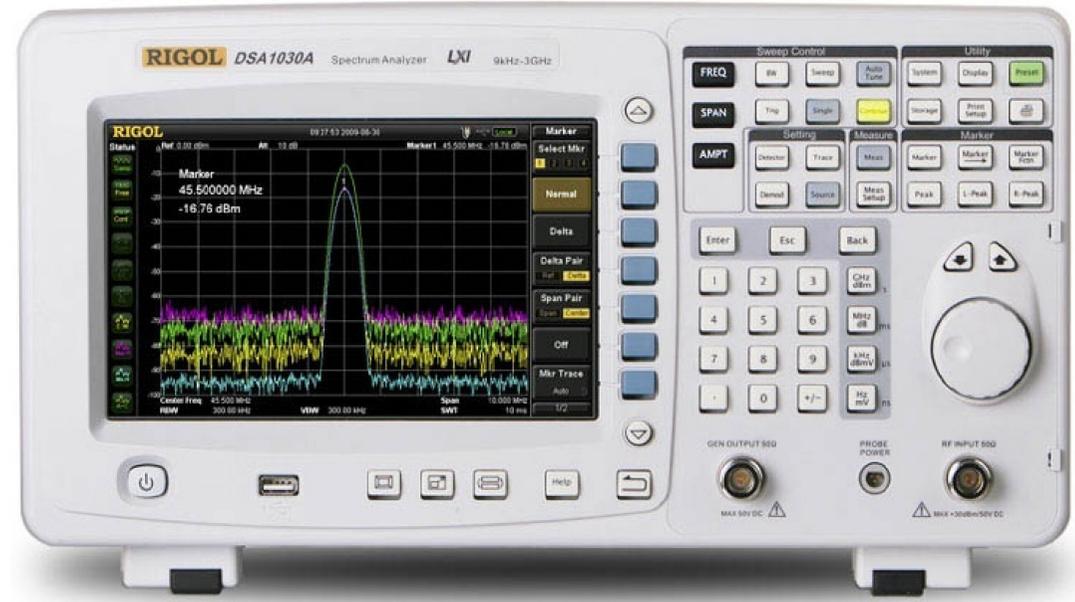
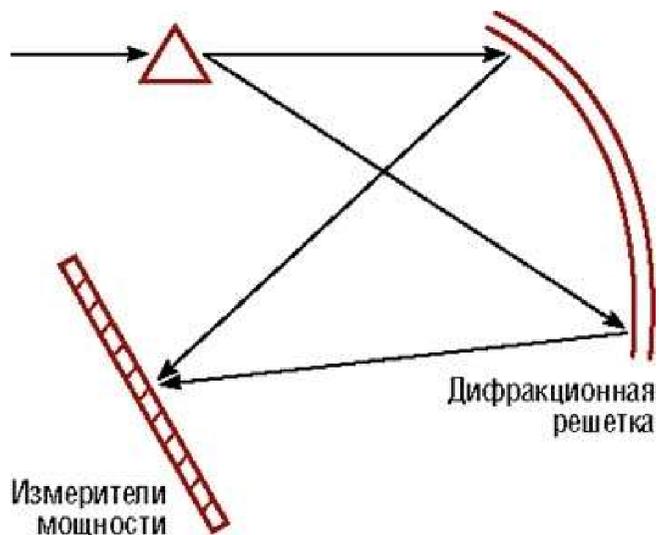


8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

○ Волоконно-оптический анализатор спектра

устройство измерения оптической мощности в зависимости от длины волны, необходимость которых связана с контролем спектра источников оптического излучения, определением степени влияния спектральных составляющих на параметры волоконно-оптических компонентов и передачу данных по волоконно-оптическим линиям связи.

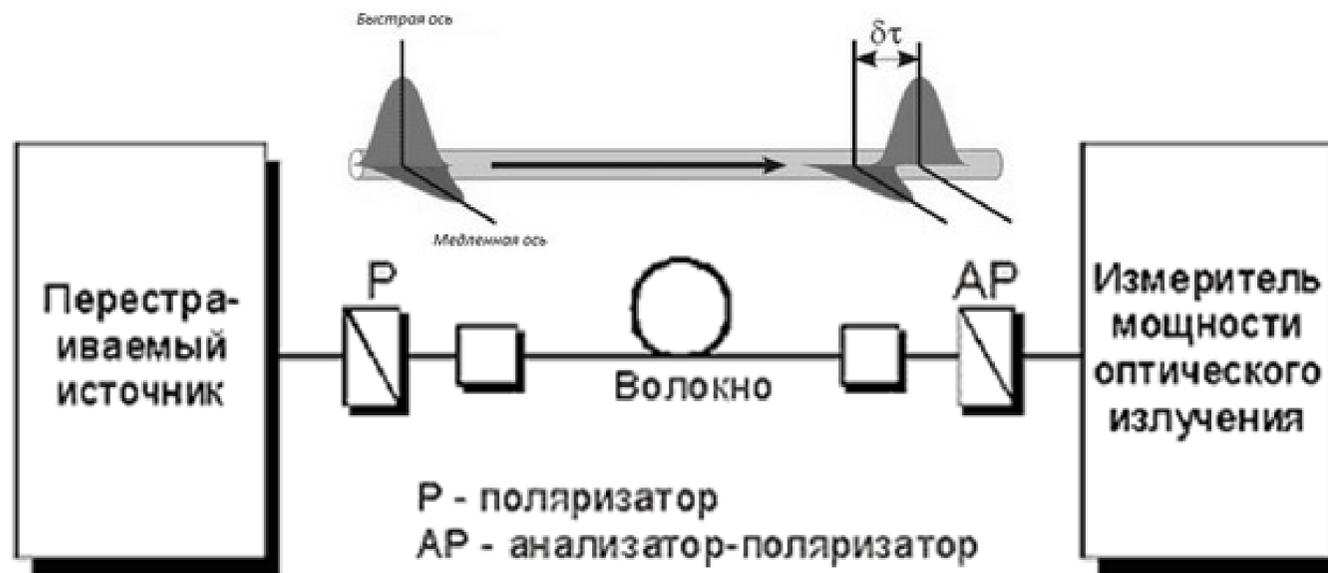
— анализаторы оптического спектра строятся на основе дифракционной решетки, интерферометров Майкельсона, Фабри-Перо и других оптических схем.



8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

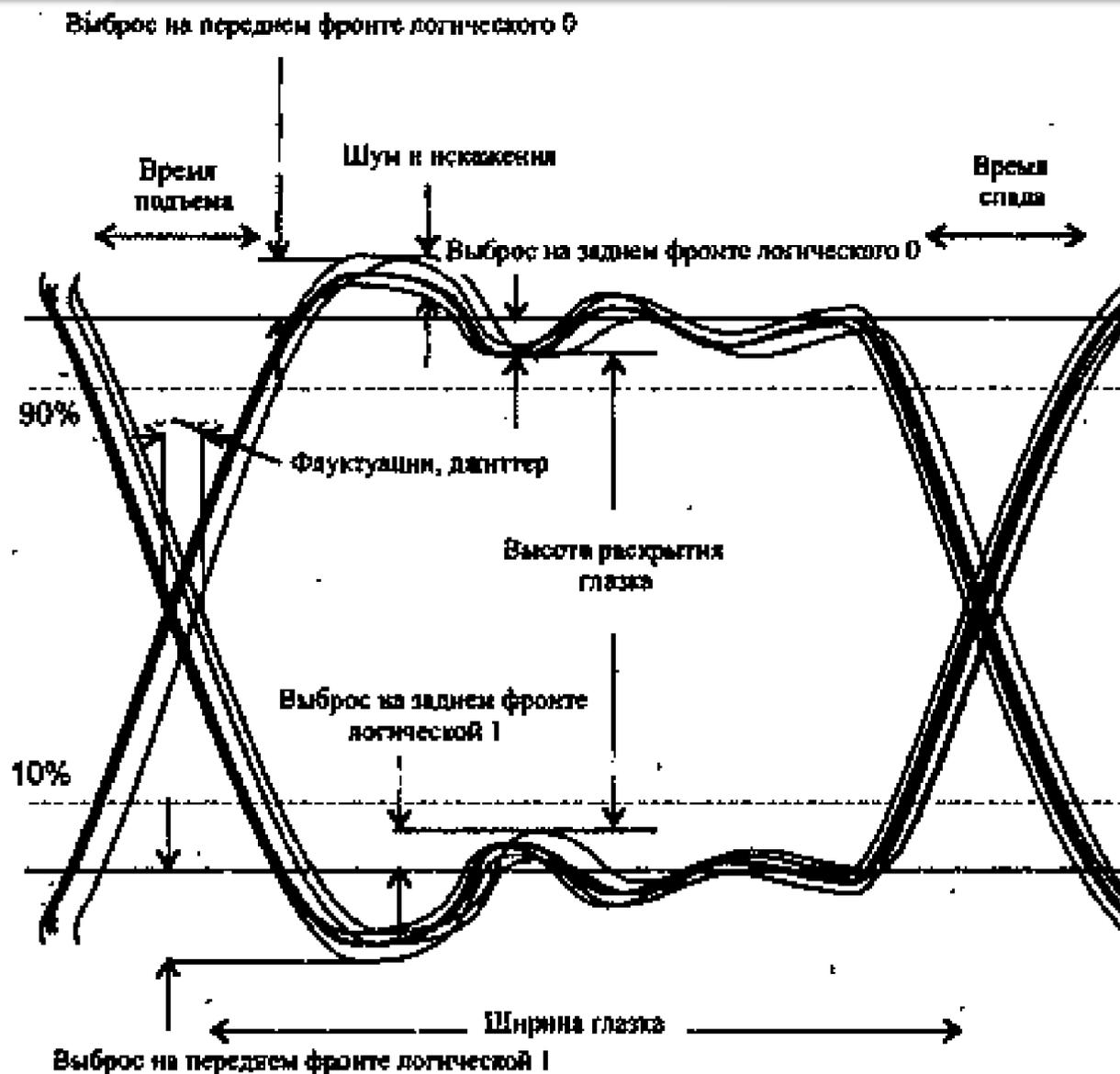
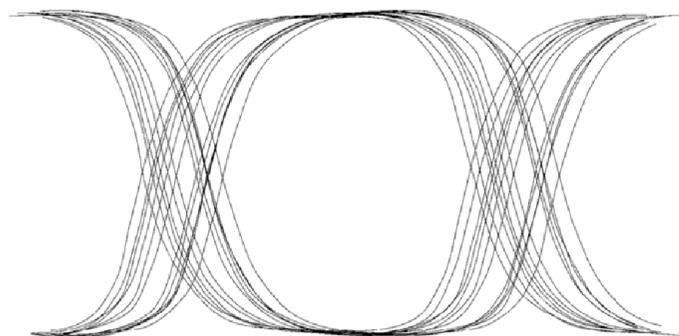
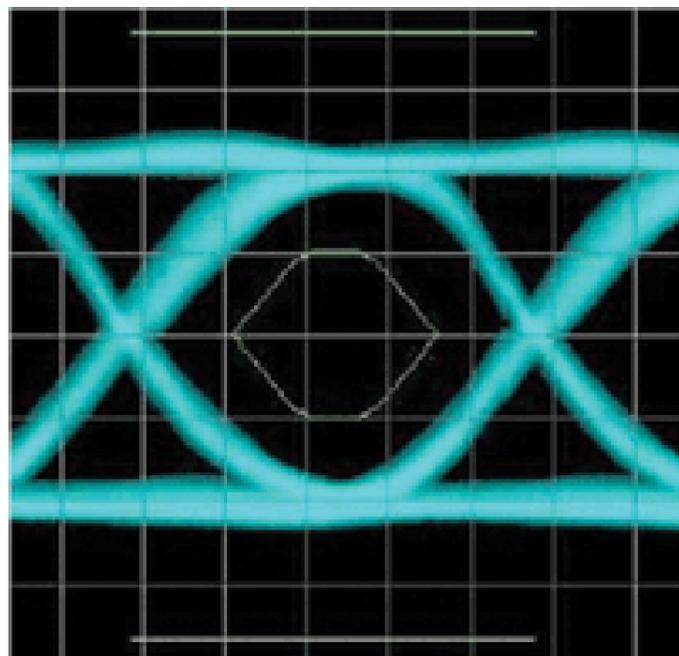
○ Волоконно-оптический анализатор поляризационной дисперсии

устройство определения времени задержки $\delta\tau$ для оптических излучений перпендикулярных поляризаций при прохождении оптического волокна длиной L , используется для определения искажений оптических импульсов в телекоммуникационных системах связи



8. Оборудование систем мониторинга оптической сети

○ Индикаторные (глазковые) диаграммы контроля цифровых линий



Темы для обсуждения по лекциям 7-8

«Волоконно-оптическая техника»

Пассивные волоконно-оптические элементы: соединение волокон.

Пассивные волоконно-оптические элементы: деление светового потока.

Пассивные волоконно-оптические элементы: управление световым потоком.

Активные волоконно-оптические элементы.

Волоконно-оптические усилители и лазеры.

Интегрально-оптические устройства.

Оборудование систем мониторинга оптической сети.