

**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 5-6

## «Волоконно-оптические преобразователи»

1. Преобразование света в оптических волокнах.
2. Волоконно-оптические измерения.
3. Амплитудные преобразования.
4. Фазовые преобразования.
5. Спектральные преобразования.
6. Поляризационные преобразования.
7. Волоконно-оптические измерительные системы.
8. Преимущества волоконно-оптических измерений.
9. Волоконно-оптические датчики и системы в обеспечении безопасности объекта информатизации.

# Измерительные преобразователи

## ○ **Понятие измерительного преобразователя**

---

устройство преобразующее измеряемую величину в вид предназначенный для дальнейшей её обработки, как правило в электрический сигнал;

преобразователи бывают прямыми, многоступенчатыми, характеризуются

- **точностью**, определяемой по погрешности – максимально возможной с заданной вероятностью разностью между измеренным и действующим значением, характеризующее точность измерения; наибольшая точность – **разрешающая способность**, т.е. наименьшая погрешность;
- **чувствительностью**, определяемую как отношение изменения выходного сигнала к изменению измеряемой величины на входе преобразователя;
- **временем отклика**, определяемого временем установления выходного сигнала при изменении величины внешнего воздействия и **полосой**, определяемой по полосе частот изменения внешнего воздействия регистрируемого преобразователем;

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ Управление световыми потоками

---

оптическое волокно является идеальным объектом для управления параметрами света проходящим через него, что связано с

- высокой концентрацией оптической мощности внутри сердцевины волокна (модового пятна);
- большой протяженностью оптического волокна с малым затуханием при условии сохранения параметров излучения;
- возможностью управления оптическими характеристиками волокна и кабеля, путем легирования, выбором конструкции, внешних и внутренних воздействий;

управление параметрами светового потока в волокне позволяет проводить

- измерение внешних воздействий и полей с высокой чувствительностью;
- преобразования параметров света с целью получения новых оптических устройств;

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ Особенности распространения света в оптоволокне характеризуется

---

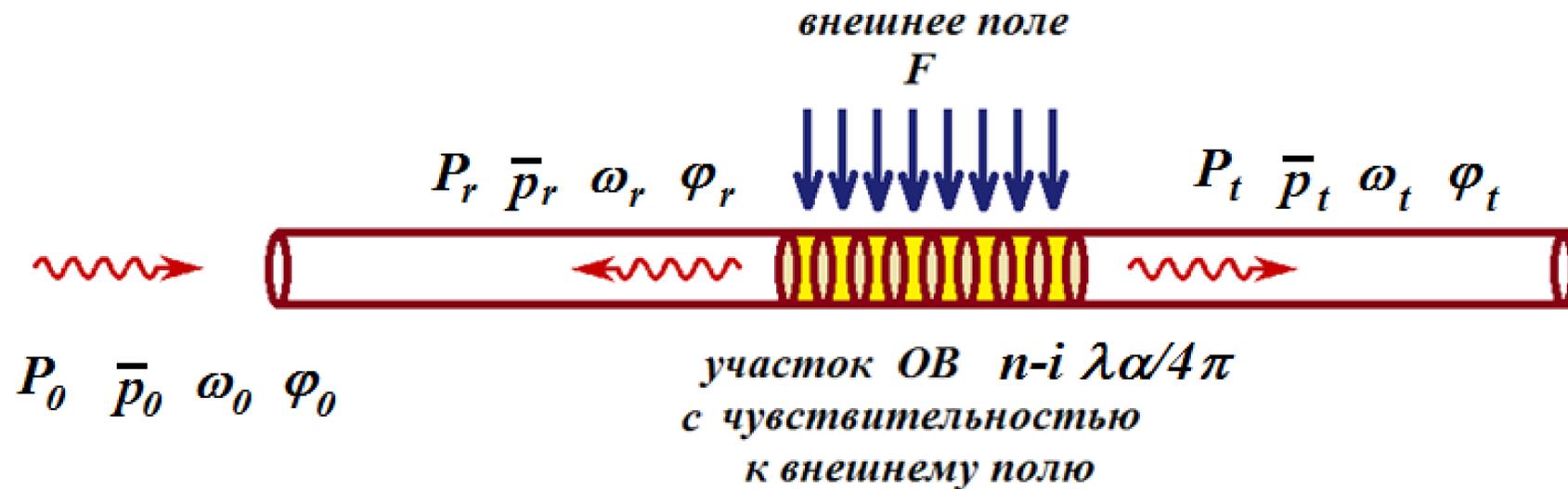
- малыми поперечными размерами волокна (диаметр 10 мкм - 100 мкм) и большой протяженностью (более 100 км) с высокой локализацией в скрученном состоянии;
- высокой направленностью – отклонение от оси меньше  $\pi/2 - \varphi_c \approx 0.1$  рад;

$$\pi/2 - \varphi_c = \arcsin(NA/n_1) = \arcsin\left(\sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}\right)$$

- низким затуханием (до 0,15 дБ/км на длине волны 1550 нм);
- высокой плотности энергии оптического излучения – для одномодового кварцевого волокна с диаметром сердцевины  $\varnothing=10$  мкм и мощностью распространяющегося излучения  $P_0=1$  мВт (0 дБм) интенсивность света составит  $I=P_0/S=13$  МВт/м<sup>2</sup> и напряженность электрического поля  $E=8,4$  МВ/см (справка: внутриатомное поле имеет величину  $E_A=5000$  МВ/см, соответствующая интенсивность  $I_A=10^{20}$  Вт/м<sup>2</sup>);
- отсутствием внешних паразитных оптических полей;

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ Понятие преобразования света во внешнем поле



при прохождении внешнего оптического излучения через участок оптоволокна ( $n-i\lambda\alpha/4\pi$ ) чувствительного к внешнему полю ( $F$ ) параметры внешнего оптического излучения ( $P_0 \ p_0 \ \omega_0 \ \varphi_0$ ) изменяются, формируя обратное излучение ( $P_r \ p_r \ \omega_r \ \varphi_r$ ) и прямое излучение ( $P_t \ p_t \ \omega_t \ \varphi_t$ ).

воздействие  $F$  может быть использовано

- для изменения (модуляции, усиления, ослабления и т.д.) параметров внешнего излучения (ВО устройства);
- для измерения параметров самого воздействия  $F$  (ВО датчики);

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ Характеристики оптического преобразователя

---

измерительный преобразователь в зависимости от изменяемого параметра оптического излучения характеризуется

— чувствительностью, определяемой как 
$$\eta = \frac{\Delta X}{\Delta F} \quad X : P, \vec{p}, \omega, \varphi$$

характеризуется высокими значениями, что связано со структурой ВОД и свойствами используемых материалов;

— точностью, которая определяется погрешностью измерения мощности оптического излучения и погрешностью выделения параметра света;

— временные характеристики (время отклика и полоса частот) волоконно-оптических измерительных преобразователей определяются высокой частотой оптического излучения;

— пространственные характеристики – разрешение измеряемой величины в пространстве имеет высокое значение порядка длины волны;

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ **Возможности волоконно-оптических датчиков (ВОД)**

---

волоконно-оптическими датчиками измеряют все физические величины:

- механические величины (деформацию, напряжения, скорость движения, ускорение, параметры колебательных процессов и др.);
- теплофизические параметры (давление, температуру, уровень жидкости, состав газовых и жидкостных смесей и др.);
- электрические и магнитные величины ( напряженность постоянных и переменных электрических и магнитных полей, силу тока, магнитный поток и др.);
- характеристики радиационных излучений (доза излучений, интенсивность излучения и др.);

# 1. Преобразование света в оптических волокнах

## ○ Выводы

---

волоконно-оптические преобразователи один из наиболее эффективных методов проведения измерений, что связано с

- высокой чувствительностью к измеряемым параметрам физического поля;
- высокой точностью и разрешающей способности измеряемого параметра по времени и в пространстве;

а также другими характеристиками

- пассивностью к электромагнитным полям;
- малыми энергетическими затратами на измерение;

## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Понятие

волоконно-оптические измерительные системы (датчики) – системы в которых для измерения используются волоконно-оптические технологии для преобразования и/или для передачи информационного сигнала, т.о. к волоконно-оптическим относят датчики:

1. прямые (с чувствительным элементом в виде световода);
2. комбинированные с чувствительными элементами обычного типа с или без электрических элементов питания, но с волоконно-оптической линией передачи данных измерения, как правило, в аналоговой форме;
3. комбинированные с чувствительными элементами обычного типа с электрическими элементами питания и волоконно-оптической линией передачи энергии и данных;



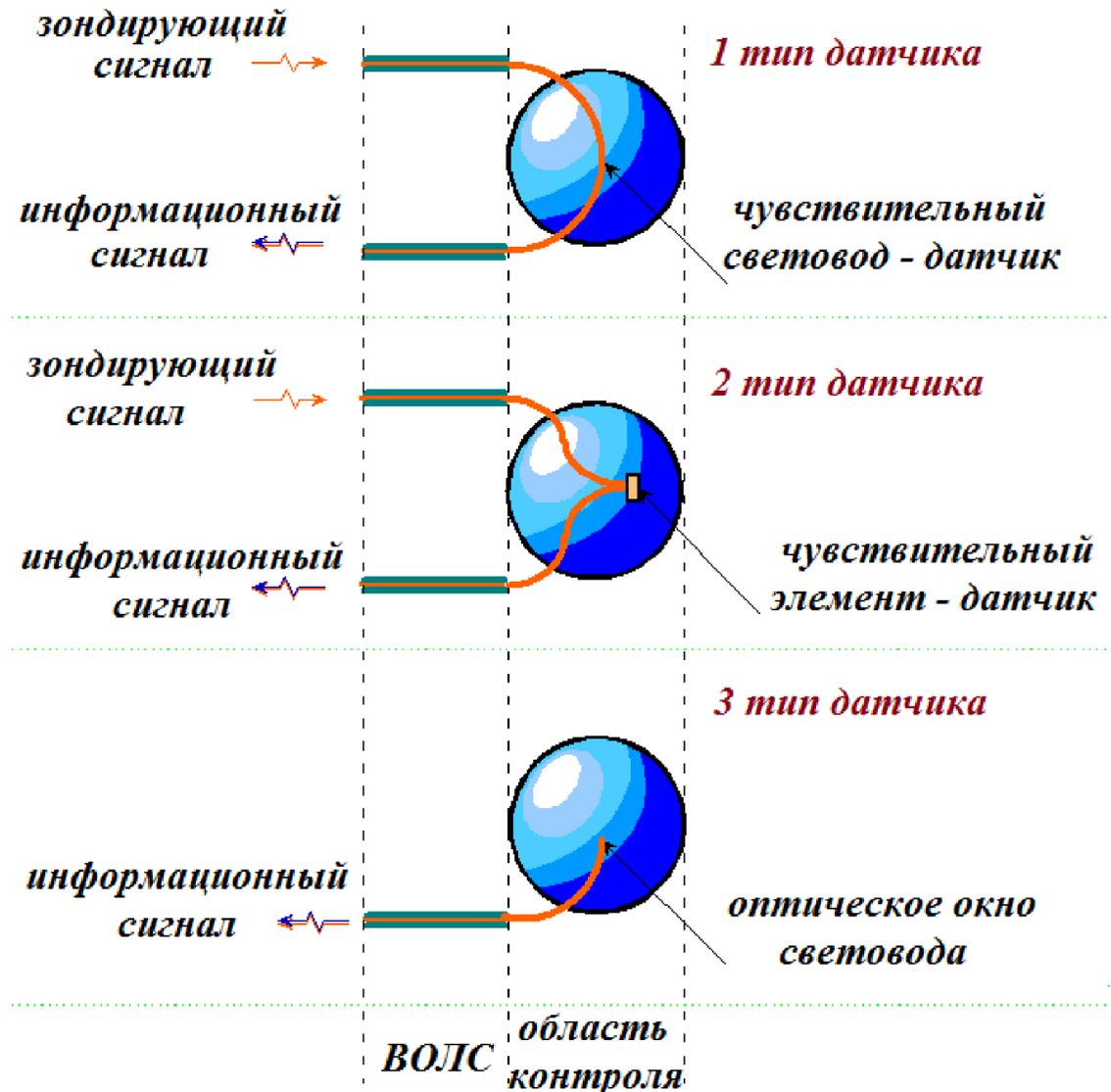
## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Типы датчиков по оптической схеме

**1\_тип - проходящего типа (с внутренним преобразованием),** зондирующее излучение проходит по чувствительному элементу в виде волоконно-оптической петли;

**2\_тип - отражательного типа (с внешним преобразованием),** зондирующее излучение взаимодействует с чувствительным элементом, расположенным на поверхности специального оптического волновода или выходит за пределы световода в отдельный оптический преобразователь физического поля;

**3\_тип - антенного типа (генерационные),** информационное оптическое излучение генерируется в окружающей среде или на поверхности световода.



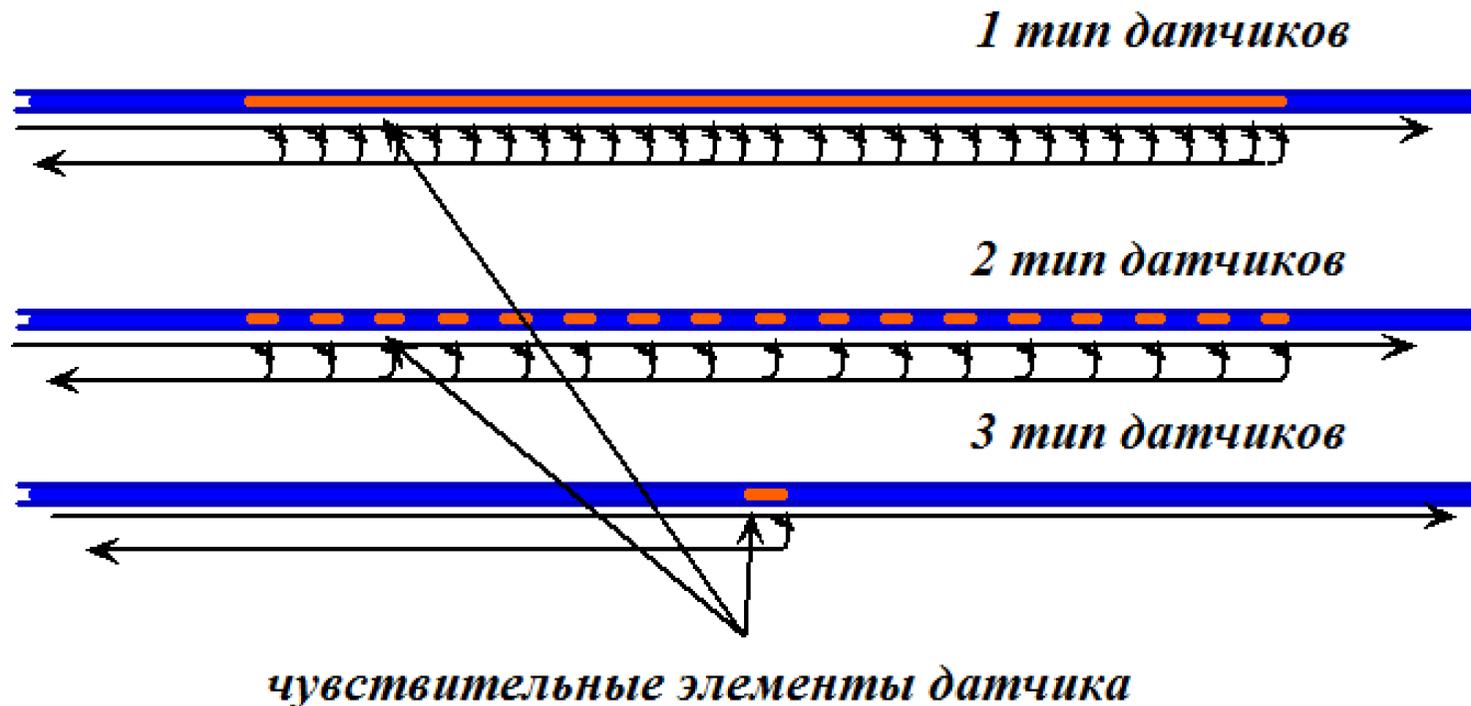
## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Типы датчиков по конструкции преобразователя

**1\_тип** - **распределённые**, все волокно является чувствительным элементом;

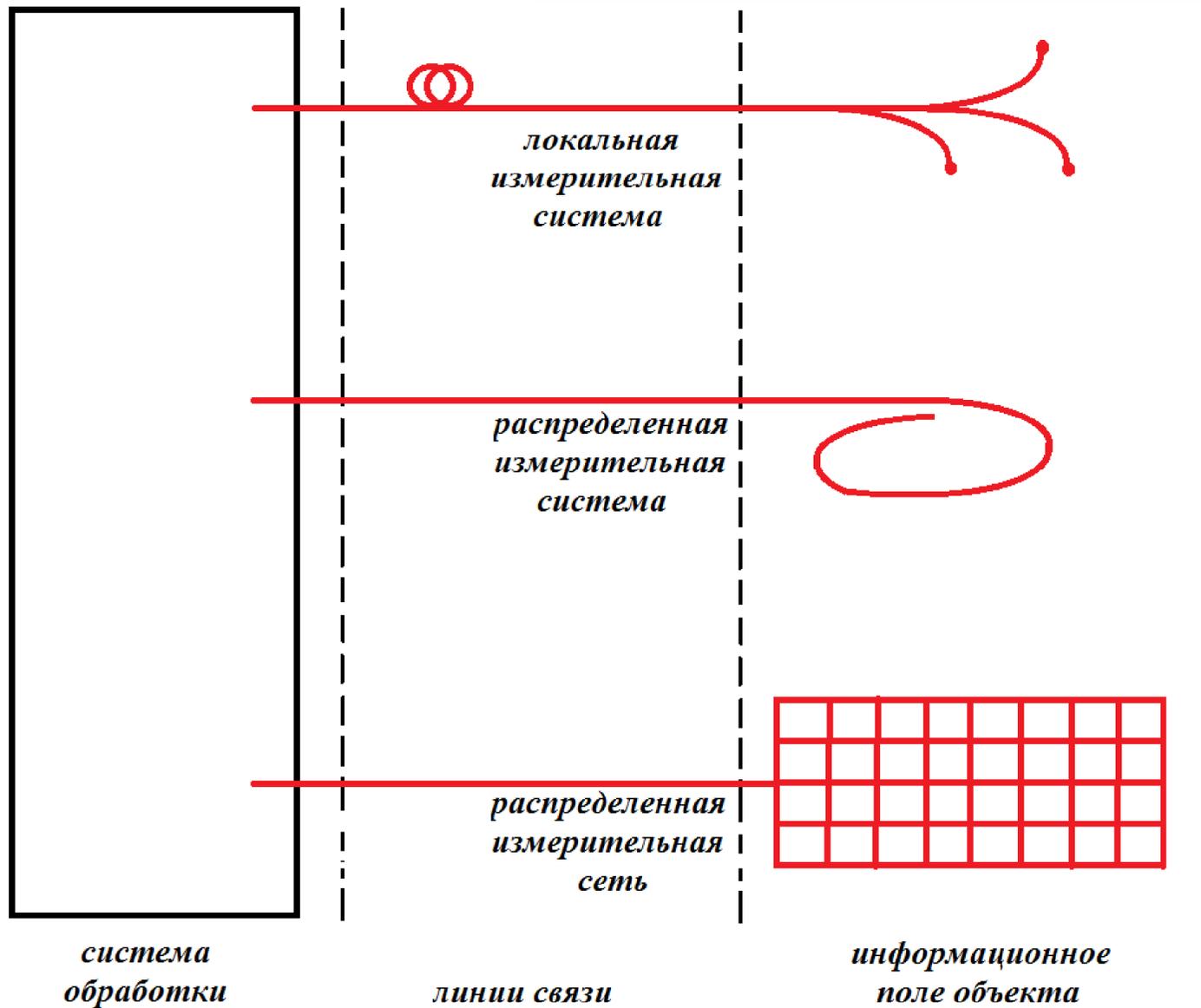
**2\_тип** - **квази-распределённые**, датчик образуется из непрерывно распределенных по волокну локальных чувствительных к внешнему воздействию участков;

**3\_тип** - **точечные**, в волокне формируются локальные чувствительные к внешнему воздействию участки;



## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Типы измерительных систем по структуре измерения



## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Типы датчиков по отклику на зондирующее излучение

#### 1\_тип - амплитудной модуляции

(внешнее воздействие изменяет амплитуду электромагнитной волны светового диапазона);

#### 2\_тип - фазовой модуляции

(внешнее воздействие изменяет фазу электромагнитной волны светового диапазона);

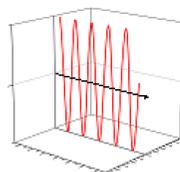
#### 3\_тип - модуляции поляризации

(внешнее воздействие изменяет поляризацию электромагнитной волны светового диапазона);

#### 4\_тип - спектральной модуляции

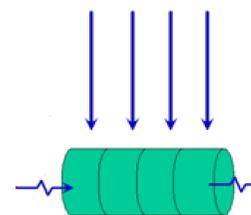
(внешнее воздействие изменяет длину волны зондирующего излучения или его спектр).

$$A = p \cdot A_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$



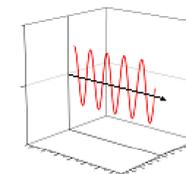
зондирующий  
сигнал

внешнее  
воздействие

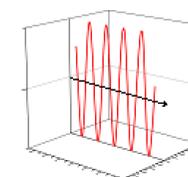


оптоволоконно  
датчик

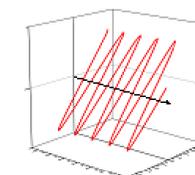
$$A = p \cdot A_x \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$



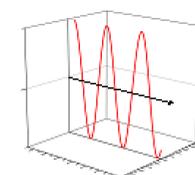
$$A = p \cdot A_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi_x)$$



$$A = p_x \cdot A_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$



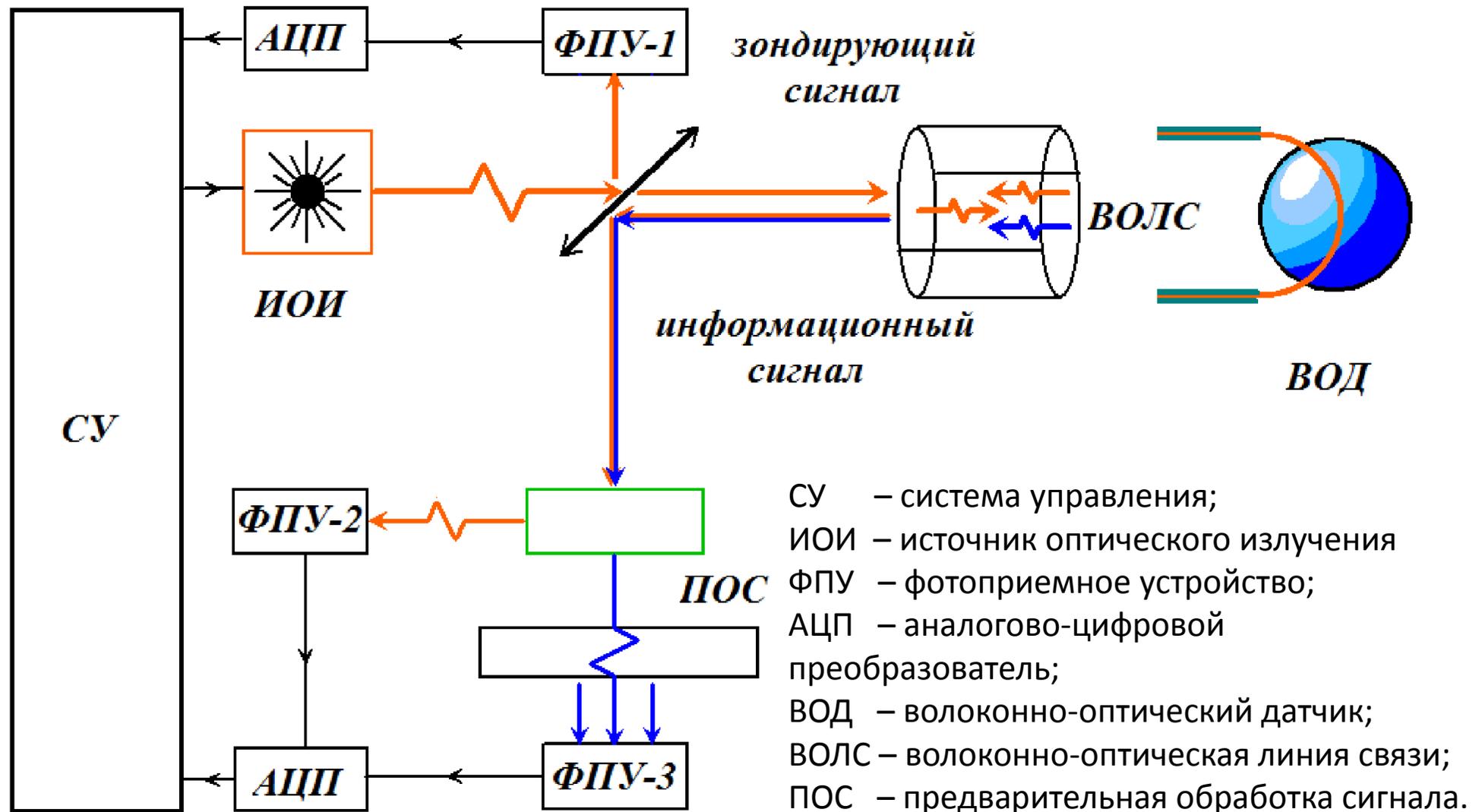
$$A = p \cdot A_0 \sin(\omega_x \cdot t + \varphi_0)$$



информационный  
сигнал

## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Обобщенная структура



## 2. Волоконно-оптические измерения

### ○ Выводы

---

#### волоконно-оптические датчики (ВОД)

*назначение –*

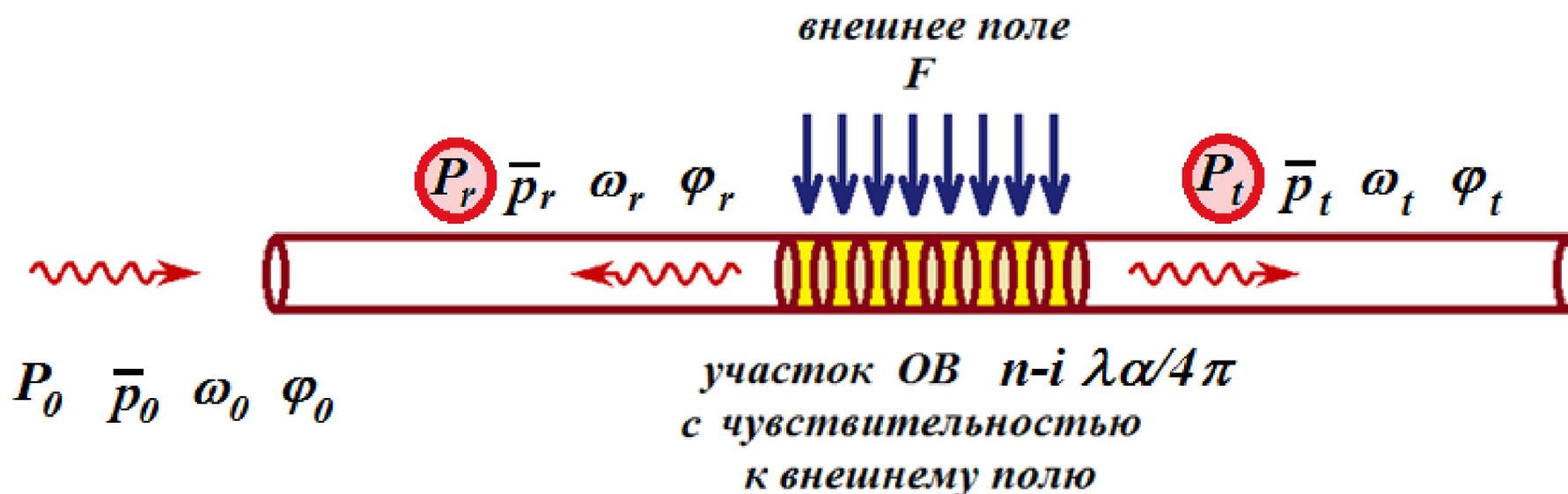
преобразование параметров измеряемого физического поля в информационный оптический сигнал, что производится с помощью модуляции измеряемым физическим полем свойств специального оптического волновода, которое модулирует параметры оптического зондируемого сигнала и сигнал становится информационным, т.е. несущим информацию о измеряемом физическом воздействии;

*структура –*

специальный оптический волновод чувствительный к измеряемому воздействию (в виде специально подготовленного световода или специальных волноводных структур) или преобразователь внешнего физического поля другого вида, связанный волоконно-оптической линией связи с системой обработки;

### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ Понятие амплитудных ВОД



воздействие внешнего поля  $F$  вызывает прямое изменение (модуляцию) мощности проходящего  $P_t$  и возвращаемого излучения  $P_r$

$$P_t [P_r] = P(\vec{F}) \Rightarrow \vec{F} \quad \text{с чувствительностью} \quad \eta = \Delta P / \Delta F$$

регистрация мощности оптического излучения  $P_t [P_r]$  в прямой или обратной схеме измерения позволяет получить значение внешнего поля  $F$  при её демодуляции

### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ Понятие амплитудных ВОД

---

основой функционирования амплитудных датчиков является изменение показателя затухания/отражения под воздействием внешнего физического поля

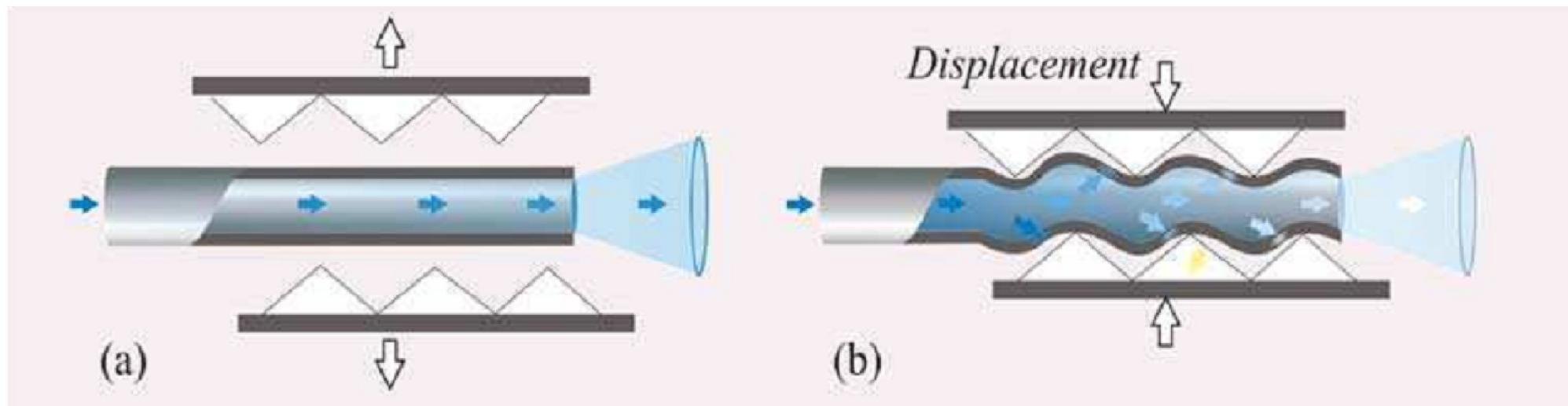
$$\alpha = \alpha(F)$$

изменения показателя затухания связываются с такими физическими эффектами как

- потери при микро- и макро изгибах оптического волокна;
- потери в переходных волоконно-оптических структурах, таких как разъемное соединение волокон;
- перекрестные переходы излучений в связанных волноводах;
- другое;

### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ АВОД на потерях при микроизгибах



$k_{\parallel}; k'_{\parallel}$  - постоянная распространения для мод  $m$  и  $m+1$

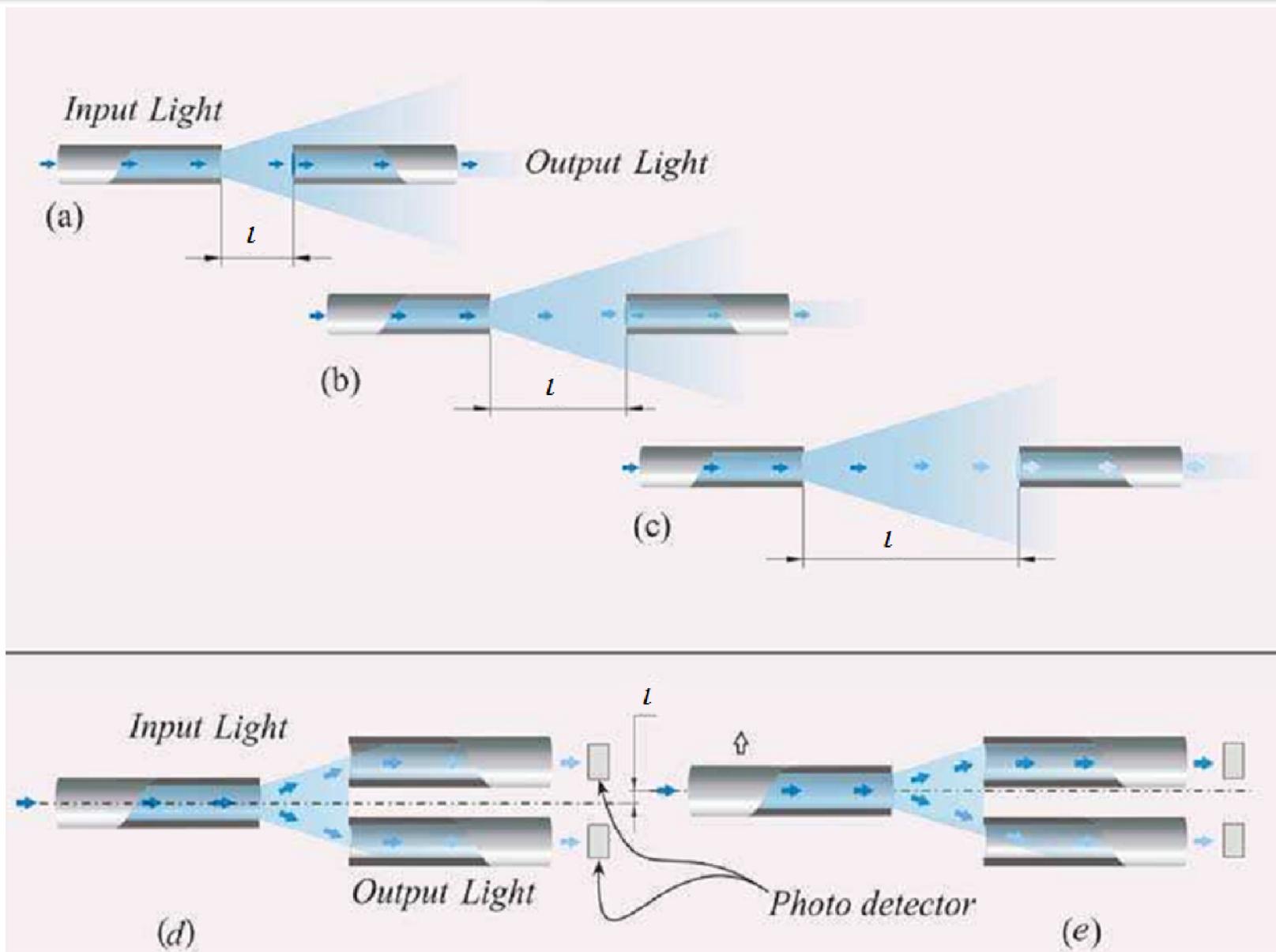
$\Lambda$  - период микроизгибов, максимум связи мод достигается при

$$k_{\parallel} - k'_{\parallel} = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

коэффициент прохождения излучения через волокно пропорционально числу деформирующих участков, упругим свойствам волокна, обратно пропорционален диаметру волокна в 4 степени

### 3. Амплитудные преобразования

- **АВОД на оптическом согласовании волокон**



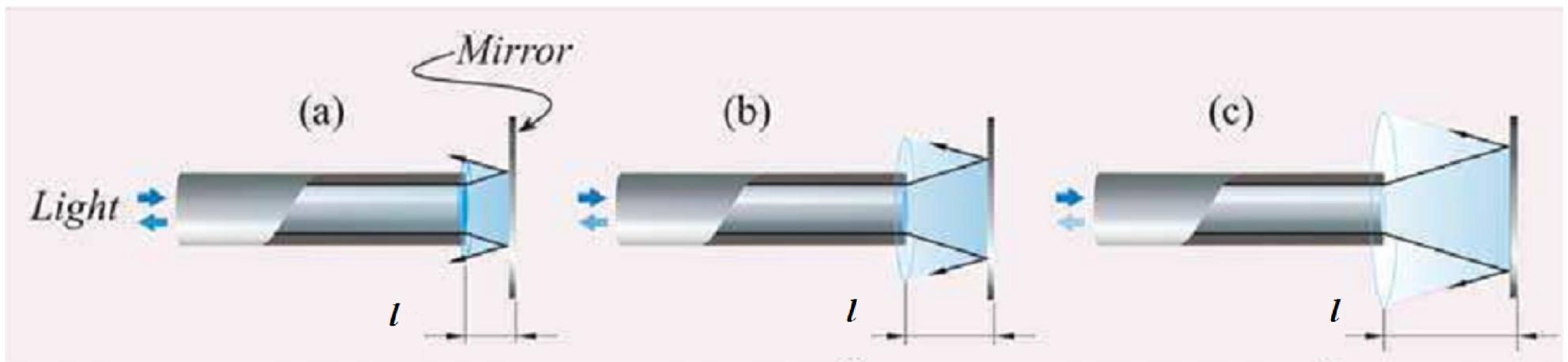
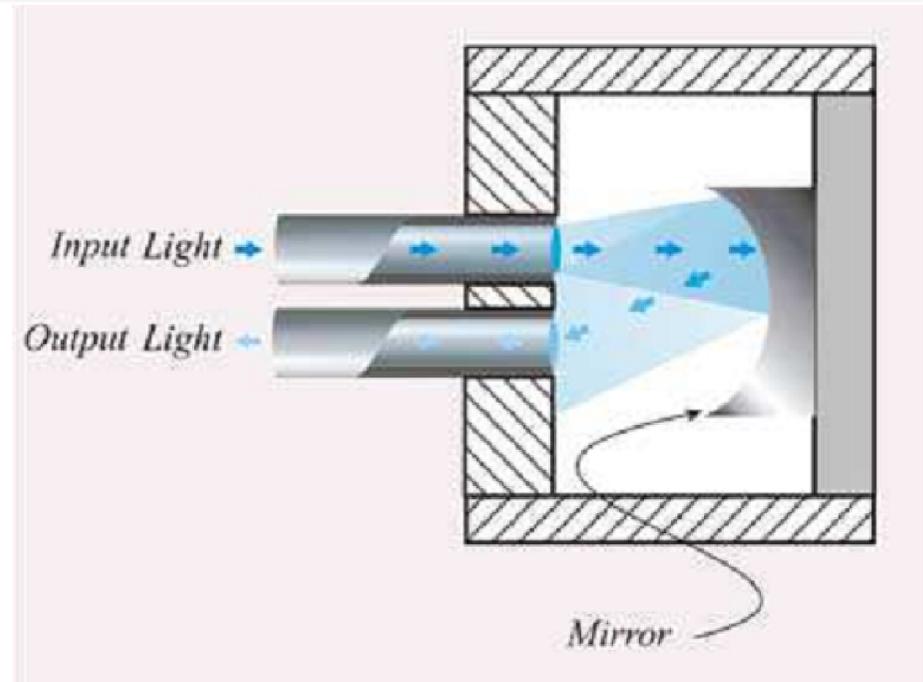
### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ АВОД на оптическом отражении

$T$  – доля возвращаемого света из волокна обратно при отражении от 100% зеркала на расстоянии  $l$

$$T = \left( 1 + 2NA \frac{2l}{d} \right)^2$$

для волокна с диаметром сердцевины  $d$  и числовой апертурой  $NA$



### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ АВОД на оптическом отражении: волоконно-оптический микрофон

##### Kingfisher SOM(4)

##### Характеристики

Маленькая легкая конструкция

Отличная точность звука

Стандартный аналоговый выход

Исключительно низкая чувствительность к вибрации

Экономически эффективное, долгосрочное решение

Высокая надежность и устойчивость к внешним воздействиям

Абсолютный иммунитет против электромагнитных/радиочастотных помех

Полностью пассивный датчик, в котором нет ни металлических, ни электротехнических деталей

Волоконно-оптическое соединение на увеличенной длине без потери сигнала

##### Применение

Высокая точность записи и правоохранительные органы

Высоковольтные электрические системы энергообеспечения

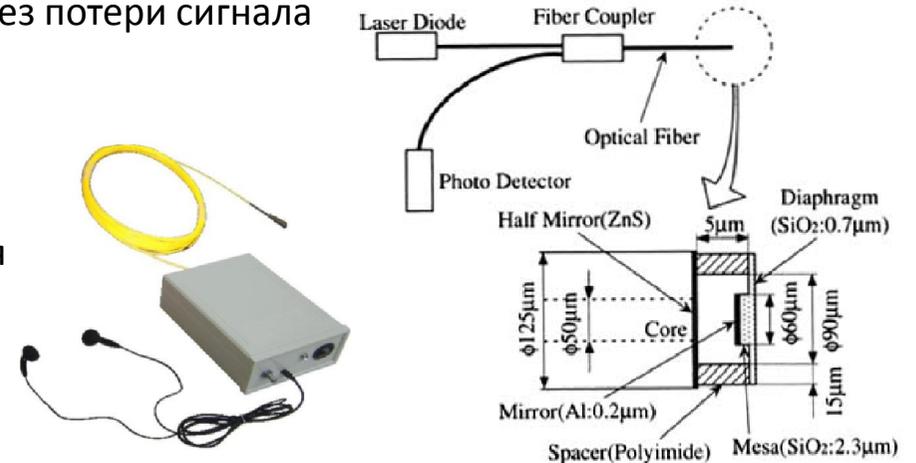
Зоны высоких радиочастот

Сильные электромагнитные поля

Промышленные и аэрокосмические измерения

Мониторинг и зондирование оборудования

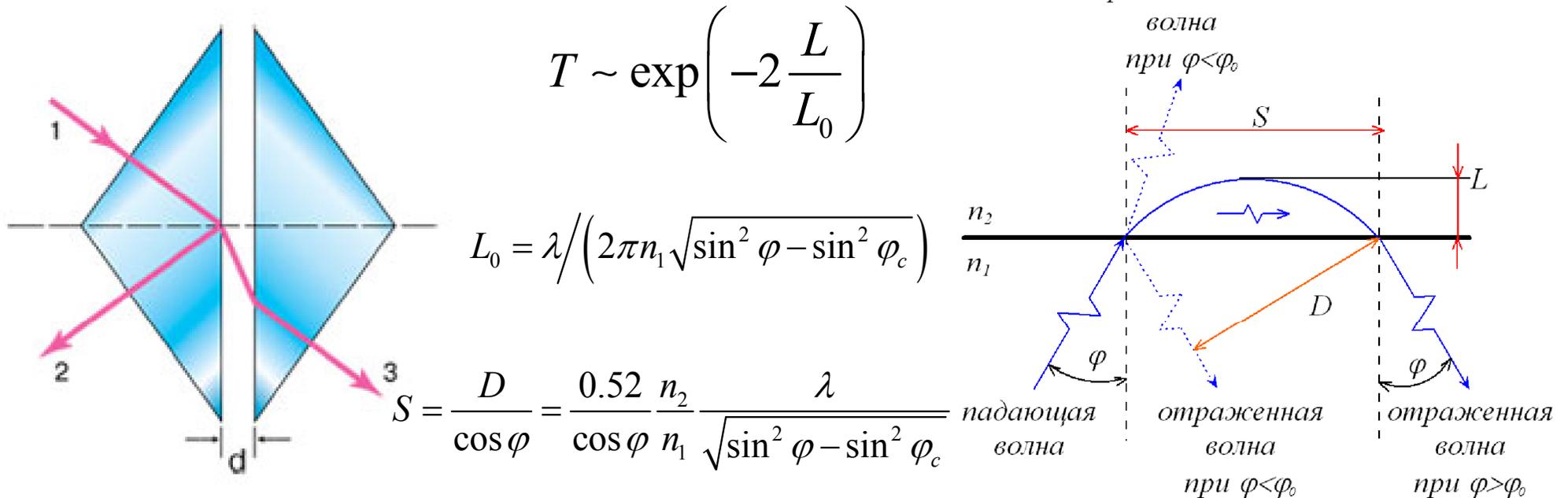
Аудио калибровка и измерение (лаборатории по тестированию электромагнитных помех)



### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ Оптическое туннелирование

нарушение полного внутреннего отражения (НПВО), явление проникновения световой волны из оптически более плотной ( $n_1$ ) в менее плотную ( $n_2 < n_1$ ) при углах падения  $\varphi$  больших критических  $\varphi > \varphi_c$ , соответствующих полному внутреннему отражению;



наблюдение НПВО: падающая под углом большим критической (1), отражённая (2) и туннелирующая (3) волны в системе двух стеклянных призм, разделённых тонким зазором  $d$

### 3. Амплитудные преобразования

#### ○ Выводы

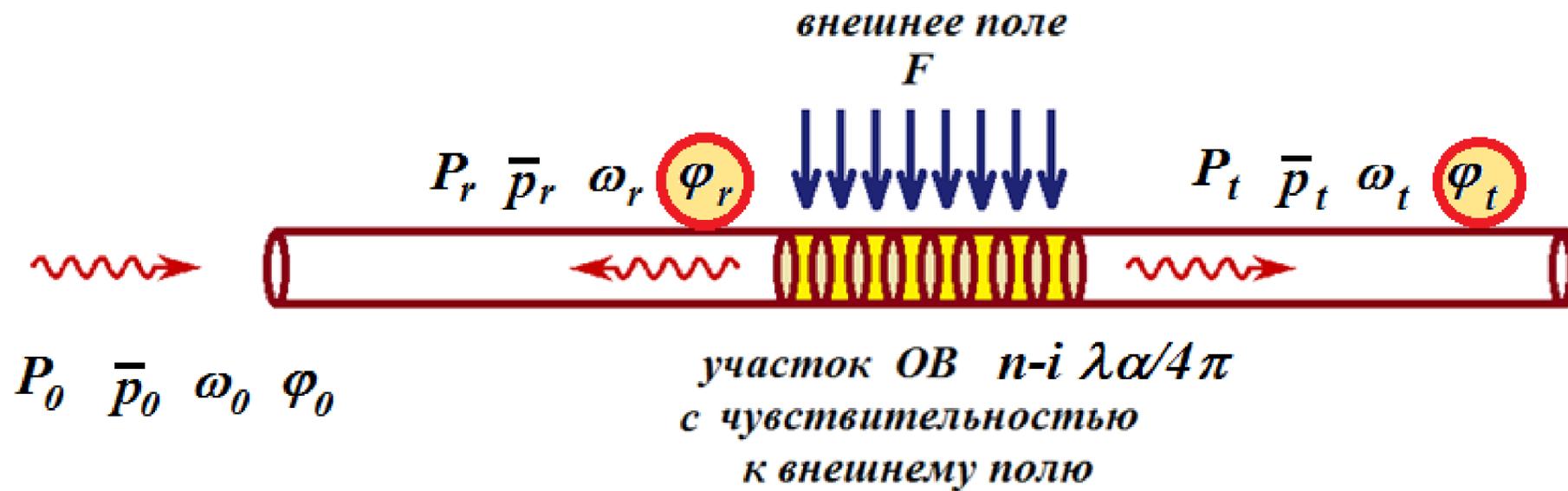
---

амплитудные волоконно-оптические датчики отличаются

- простотой конструкции, как правило, связанной с механической регулировкой мощности проходящего/отраженного излучения;
- низкими требованиями к параметрам оптического излучения;
- простотой системы регистрации – измеряется мощность излучения;

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Понятие фазовых ВОД



воздействие внешнего поля  $F$  вызывает изменение (модуляцию) фазы проходящего  $\Delta\varphi_t$  и возвращаемого излучения  $\Delta\varphi_r$

$$\Delta\varphi_t [\Delta\varphi_r] = \Delta\varphi(\vec{F}) \Rightarrow \vec{F} \quad \text{с чувствительностью} \quad \eta = \frac{\Delta(\Delta\varphi)}{\Delta F}$$

регистрация изменения фазы оптического излучения  $\Delta\varphi_t[\Delta\varphi_r]$  в прямой или обратной схеме измерения позволяет получить значение внешнего поля  $F$  при её демодуляции

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Понятие фазовых ВОД

фазовые ВОД являются наиболее чувствительными к внешнему воздействию, что связано с большой протяженностью  $L$  измерительной линии относительно длины волны  $\lambda$  излучения, так как разность фаз

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(nL)$$

измерение изменения фазы строится путем сравнения двух когерентных оптических лучей – луча (измерительный,  $S$ ) интенсивностью  $I_2$ , подвергавшегося воздействию внешнего поля, с лучом (эталонный,  $M$ ) интенсивностью  $I_1$ , не подвергавшегося воздействию, – т.е. путем интерференции двух лучей

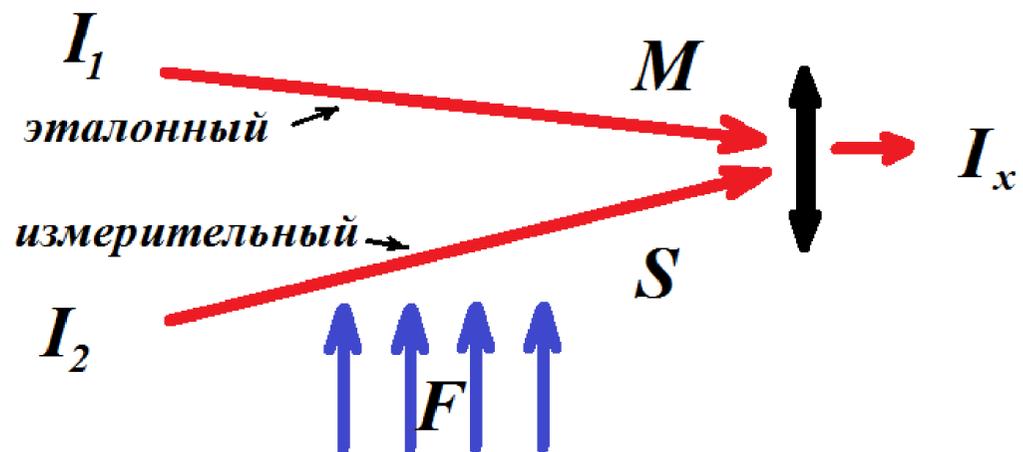
$$I_x = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi)$$

$\gamma$  - степень когерентности

$$\gamma(\Delta(nL)/\Delta\lambda) \leq 1$$

$\Delta\lambda$  - ширина линии

$\Delta(nL)$  – разность оптических путей



## 4. Фазовые преобразования

### ○ Понятие фазовых ВОД

---

изменение разности фаз  $\Delta\varphi$  сравниваемых лучей связано с различием показателя преломления  $\Delta n$  и разностью проходимых геометрических путей  $\Delta L$ , так что

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [L \cdot \Delta n + n \cdot \Delta L]$$

измерение мощности интерферируемых лучей позволяет получить значение создаваемой разности фаз

$$\Delta\varphi = \arccos\left(\frac{I_x - I_1 - I_2}{2\gamma\sqrt{I_1 I_2}}\right) + \pi m$$

таким образом, для случаев когда

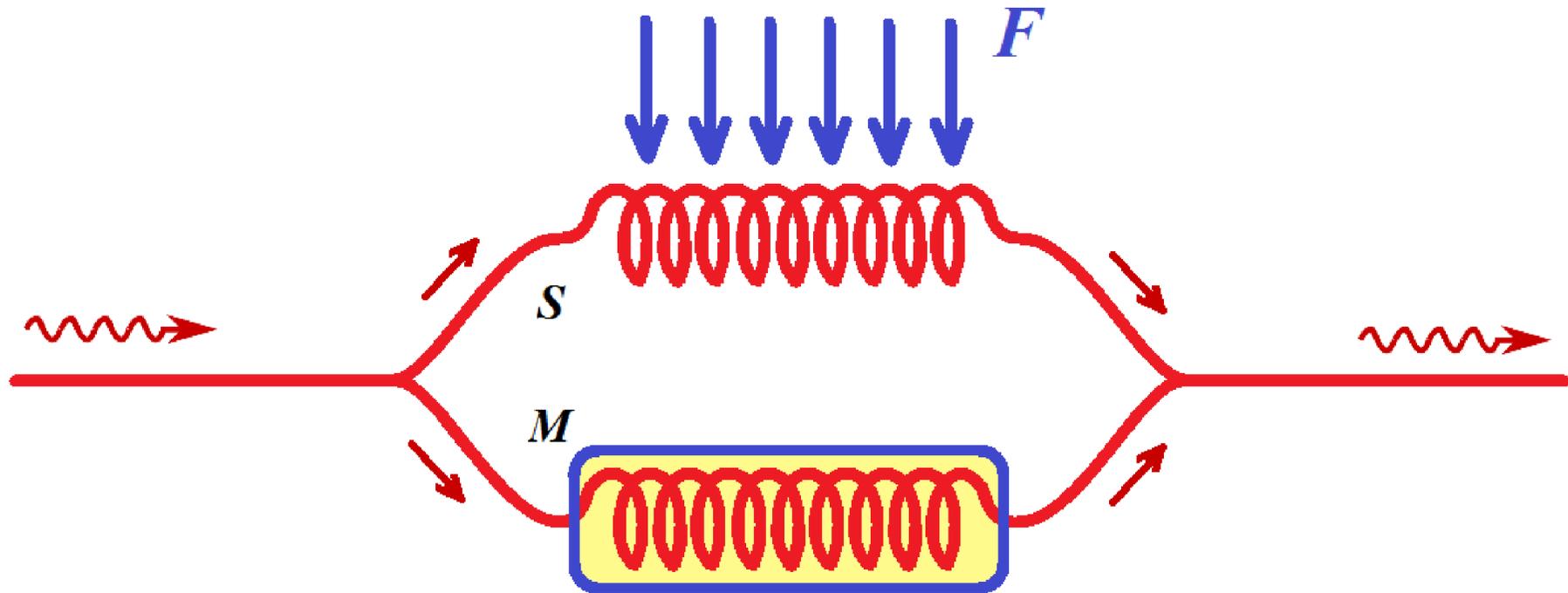
$$\begin{array}{ccc} \Delta L=0 & \text{или} & \Delta n=0 \\ \Delta n = \frac{\lambda}{2L} \left[ \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{I_x - I_1 - I_2}{2\gamma\sqrt{I_1 I_2}}\right) + m \right] & & \Delta L = \frac{\lambda}{2n} \left[ \frac{1}{\pi} \arccos\left(\frac{I_x - I_1 - I_2}{2\gamma\sqrt{I_1 I_2}}\right) + m \right] \end{array}$$

как видно,

изменение показателя преломления  $\Delta n \sim (\lambda/L)$ , а изменение длины геометрического пути  $\Delta L \sim \lambda$ , учитывая  $\lambda \ll L$  можно получить высокую чувствительность в внешнему воздействию F;

## 4. Фазовые преобразования

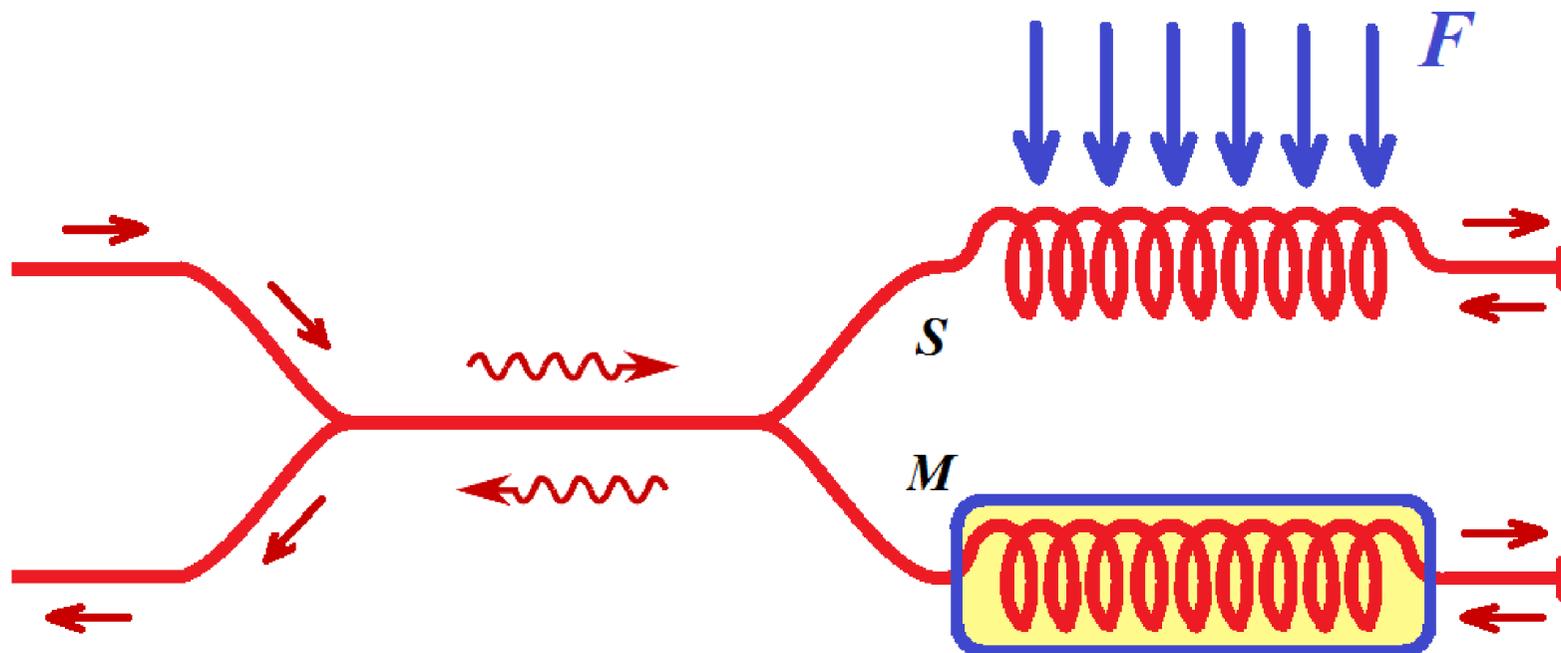
### ○ Интерферометр Маха-Цандера



входное излучение делится на два, одно из которых проходит через волокно чувствительное (S) к внешнему воздействию  $F$ , а другое проходит через волокно (M) экранированное от внешнего воздействия  $F$ ;  
на выходе, после прохождения плеч интерферометра (S и M), лучи объединяются и интерферируют – формируя интерференционные биения  $\sim F$ ;

## 4. Фазовые преобразования

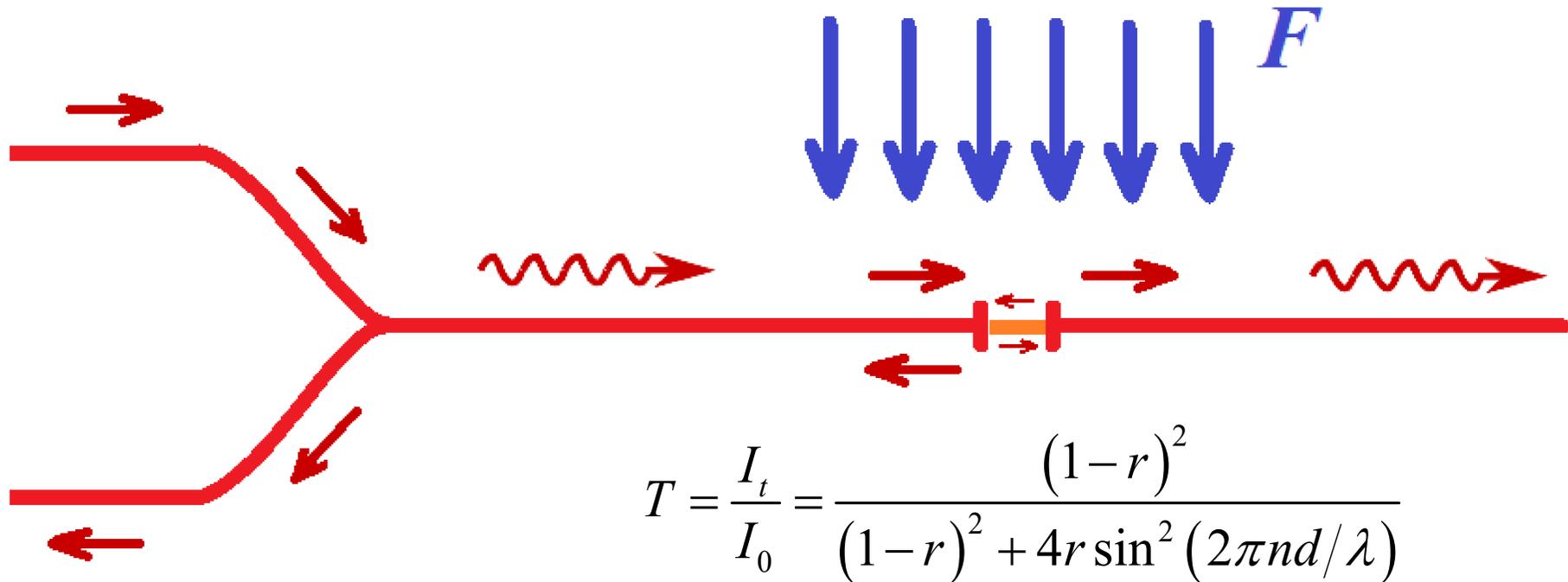
### ○ Интерферометр Майкельсона



входное излучение разбивается на два и проходит в измерительное (S) и эталонное (M) плечи с зеркалами на концах, возвращающееся из двух плеч объединяется и выходит в другое волокно для регистрации мощности в интерференции излучений;

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Интерферометр Фабри-Перо



обратно возвращаемое излучение формируется на участке волокна ограниченного двумя отражающими границами с коэффициентами отражения  $r$ , в результате многократного отражения и интерференции проходит излучение интенсивности  $I_t$  при входной интенсивности  $I_0$  на длине волны  $\lambda$ ;  $d$ ,  $n$  – длина резонатора и показатель преломления в резонаторе;

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Микрорезонаторные ВОД

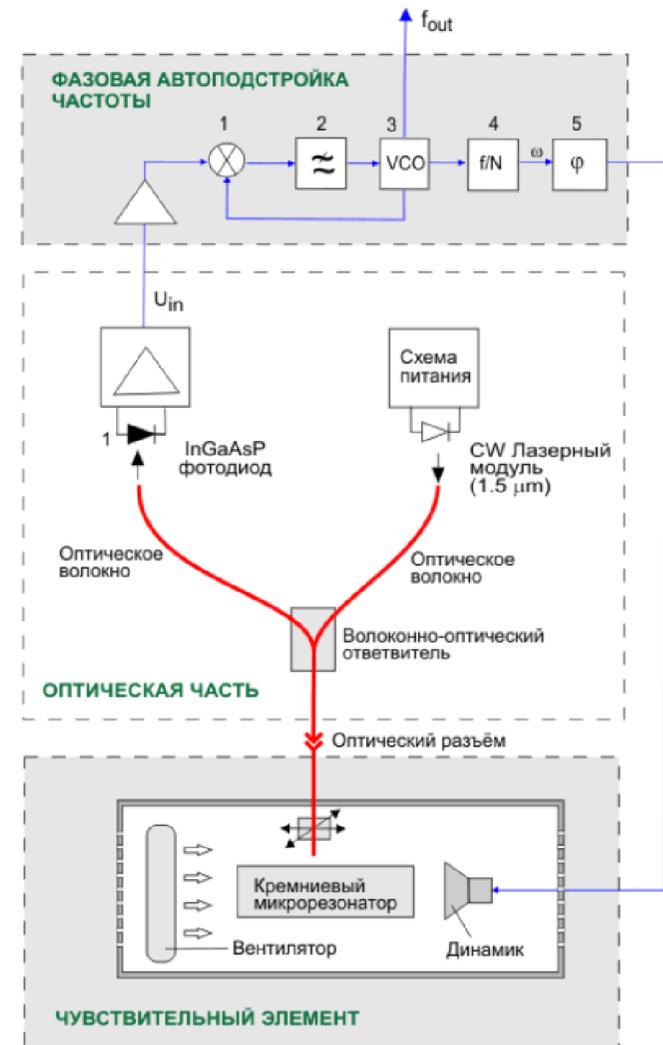
<http://physics.nad.ru/sensors/Cyrillic/hyrometer.htm>

чувствительного элемента датчика - кремниевый механический резонатор, чувствительный к относительной влажности воздуха (изменении относительной влажности от 100% до 0% резонансная частота изменялась от 2,21 до 2,54 кГц.

Для увеличения быстродействия был установлен вентилятор, который создавал поток воздуха вблизи резонатора. Резонансные колебания возбуждались акустически при помощи миниатюрного динамика. Добротность резонатора составляла около 1000.

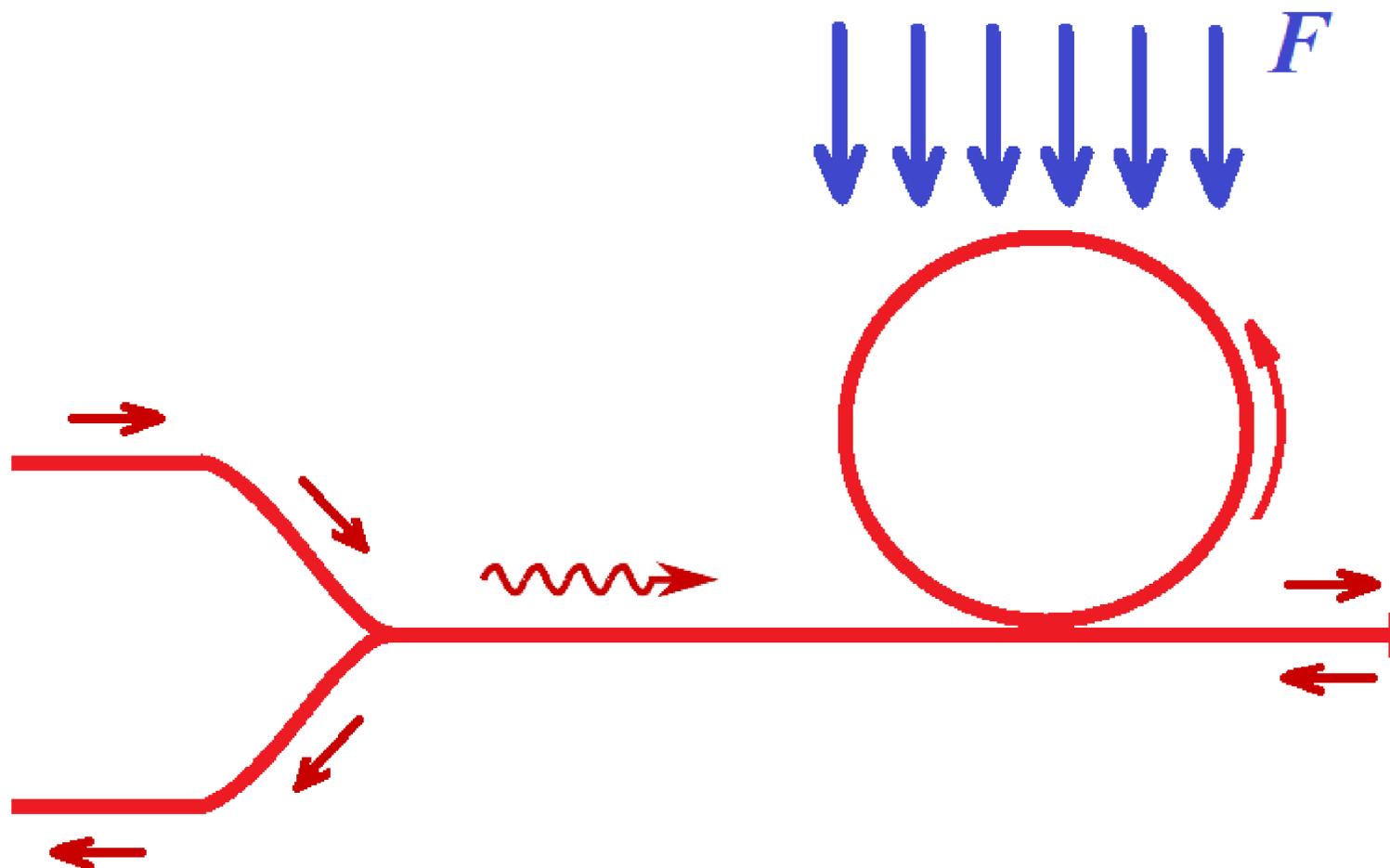
Колебания микрорезонатора регистрируются при помощи волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, образованного торцом волокна и частично отражающей поверхностью резонатора. Амплитуда колебаний микрорезонатора  $1/8$  длины волны света, т.е. около 0,2 микрометра.

При колебаниях микрорезонатора изменялась отражающая способность интерферометра и фотоприёмник регистрировал модуляцию интенсивности света на частоте колебаний резонатора.



## 4. Фазовые преобразования

### ○ Кольцевой интерферометр Фабри-Перо

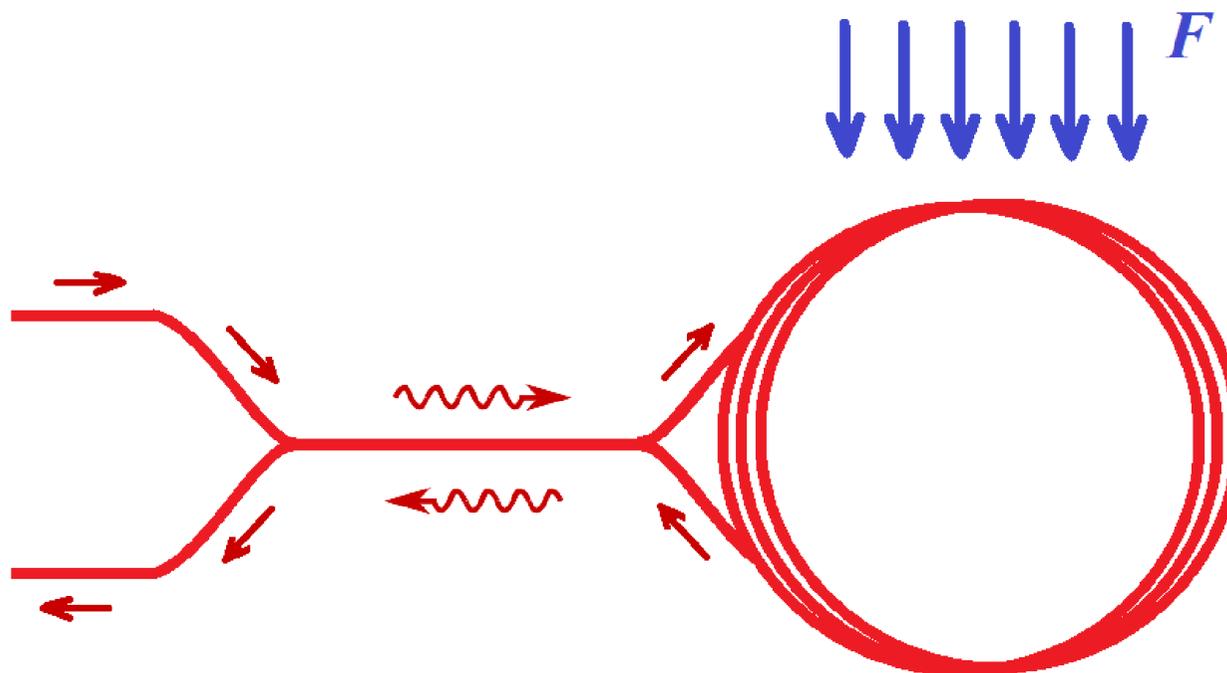


оптическая схема с многократным прохождением луча через волоконно-оптическое кольцо соответствует описанию многолучевого интерферометра Фабри-Перо, дополнительный набег фазы формируется в волоконном кольце;

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Интерферометр Саньяка

входное излучение при входе в кольцевой резонатор делится на две волны распространяющиеся на встречу друг другу и при объединении они интерферируют между собой образуя биения, определяемые различием в ходе лучей во встречных направлениях, т.е. при условии формирования невзаимности для встречного хода лучей при внешнем воздействии – например, вращении;



## 4. Фазовые преобразования

### ○ Примеры: датчик угловой скорости

вращение интерферометра Саньяка с угловой скоростью  $\Omega$  приводит к невзаимности в распространении встречных мод – одна мода движется вместе с интерферометром в совпадающем направлении, а другая в противоположном направлении, что создает разность хода и разность фаз

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{4SN}{c} \right) \Omega$$

$S$  – площадь контура  
 $N$  – число витков в контуре  
 $c$  – скорость света в вакууме

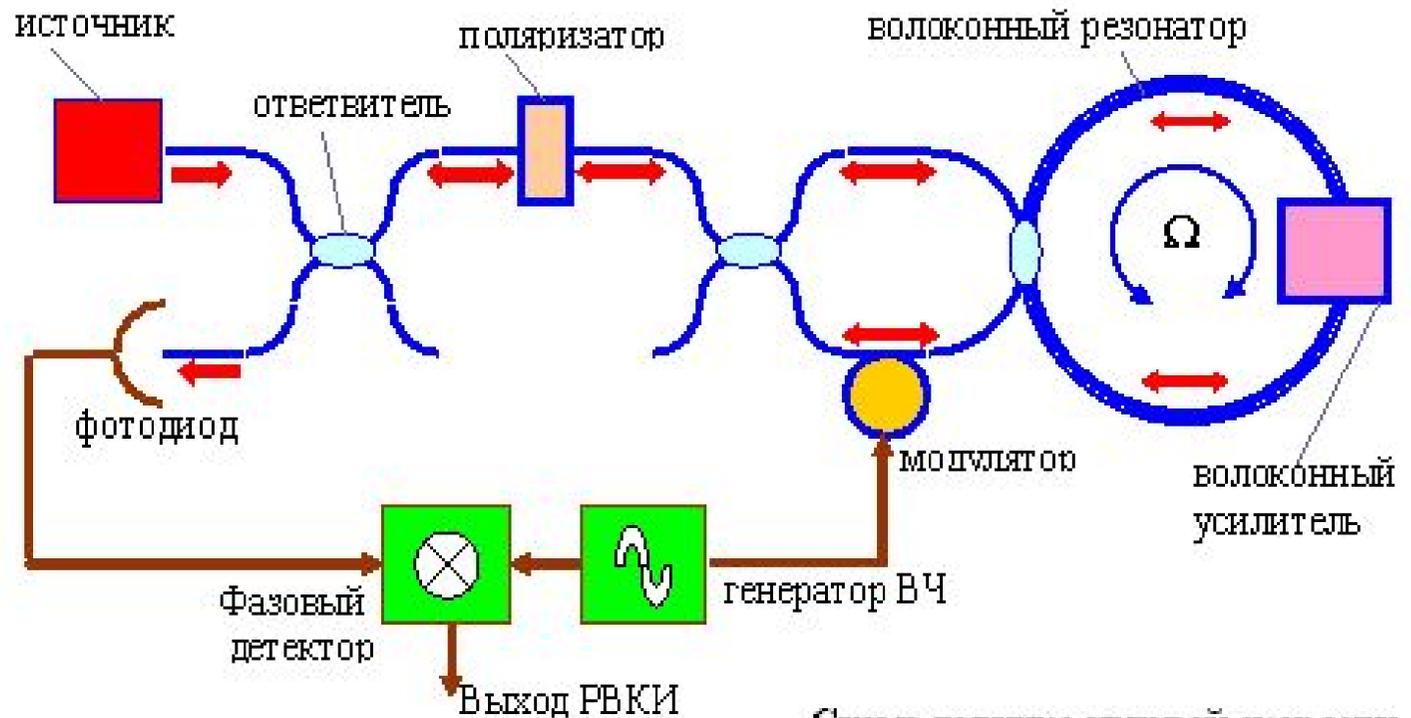
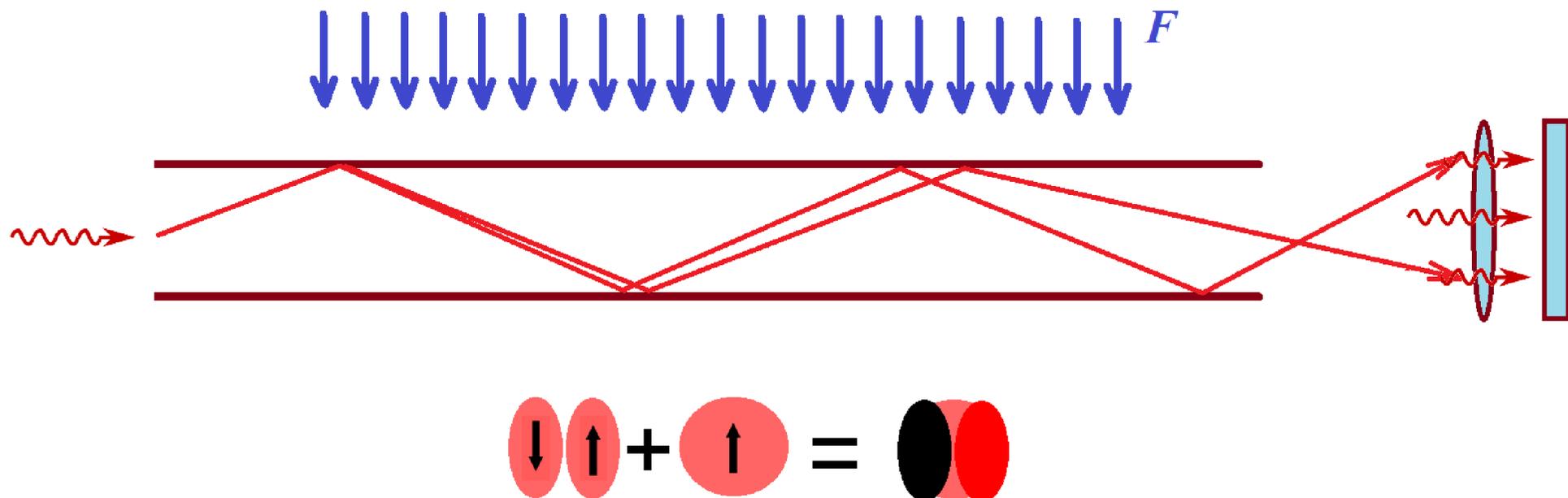


Схема датчика угловой скорости

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Одноволоконный многомодовый интерферометр



в любом многомодовом волокне различные моды проходят пути разной длины, что приводит к интерференции – проявляемое в виде не равномерного случайного распределения интенсивности света по поперечному сечению волокна (спекл-структуры);

воздействие на волокно в виде изгиба, деформации и др. приводит к микроскопическим изменениям путем проходимых различными модами, что приводит к изменению спекл-структуры

## 4. Фазовые преобразования

### ○ Выводы

---

фазовые волоконно-оптические датчики отличаются

- высокой чувствительностью к измеряемому параметру;
- обладают высоким быстродействием (время прохождения света плеча);
- реализуются в схемах на прохождение и на отражение;
- требовательны к источнику излучения (должен быть когерентным);

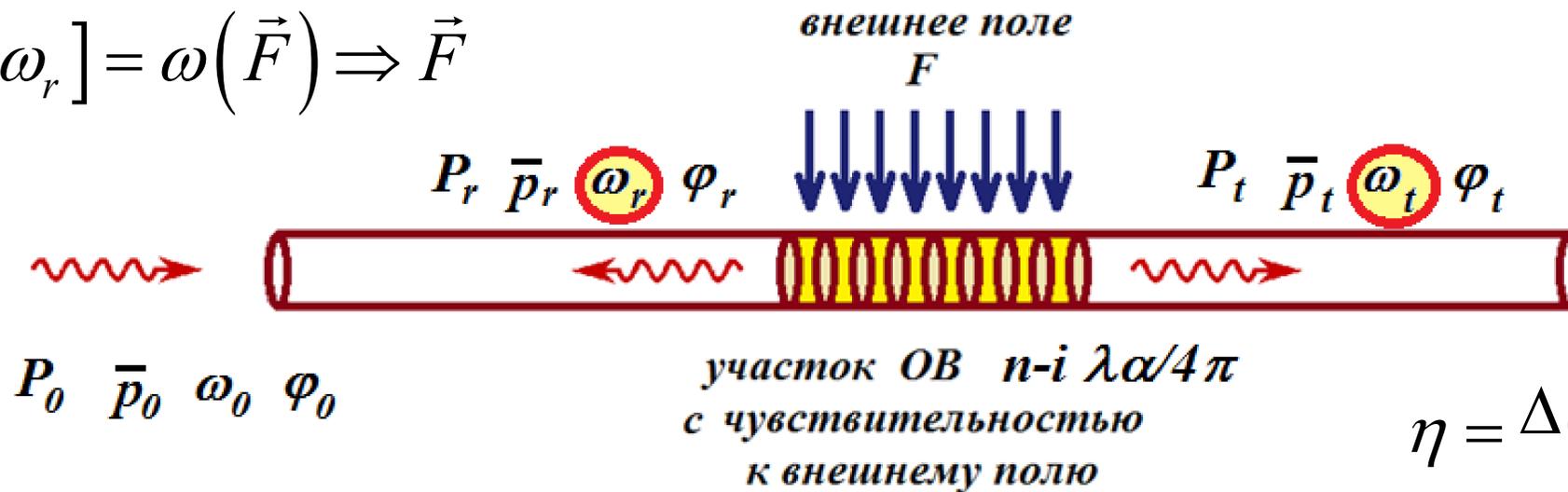
по конструкции они строятся на основе интерферометров

Маха-Цендера, Майкельсона, Фабри-Перо, Саньяка и многомодовых интерферометров

## 5. Спектральные преобразования

### ○ Понятие спектральных ВОД

$$\omega_t [\omega_r] = \omega(\vec{F}) \Rightarrow \vec{F}$$



$$\eta = \Delta\omega / \Delta F$$

прохождение оптического излучения через волокно под внешним воздействием приводит к изменению спектрального состава прямого и обратного излучения, что связано с

- нелинейно-оптическими эффектами;
- люминесценцией в области воздействия;
- искажениями спектра широкополосного излучения;
- другое;

## 5. Спектральные преобразования

### ○ Понятие спектральных ВОД

---

основой функционирования спектральных датчиков является изменение спектральной зависимости показателя преломления и затухания под воздействием внешнего физического поля

$$\alpha_{\omega} = \alpha_{\omega}(F) \quad n_{\omega} = n_{\omega}(F)$$

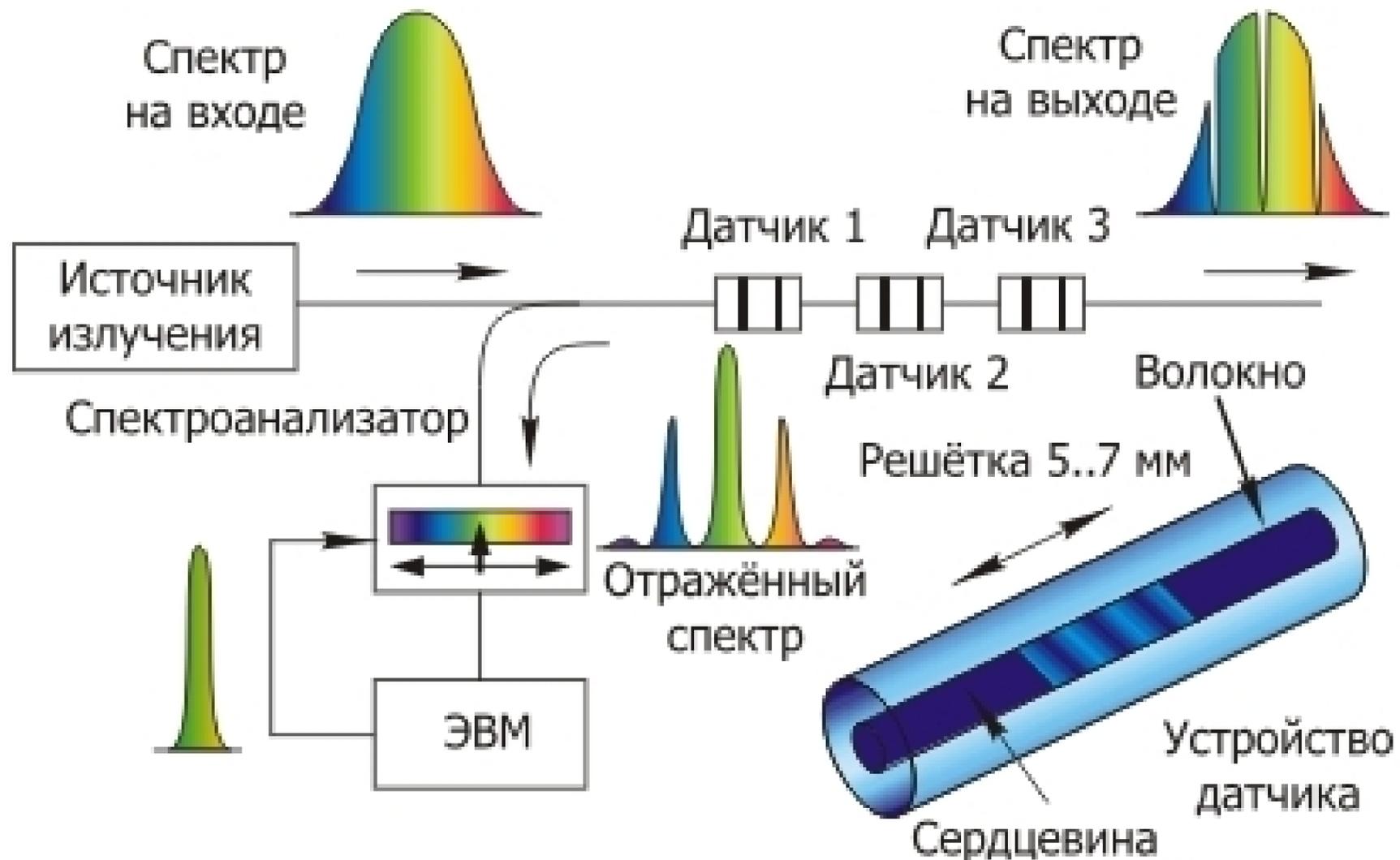
спектральные изменения показателей преломления и затухания связываются с такими физическими эффектами как

- изменение внутренней структуры волокна по показателю преломления или поглощения;
- дисперсия эффектов рассеяния, преломления, поглощения;
- нелинейно-оптическими эффектами;

замечание: генерационные (люминесцентные) датчики функционируют на основе собственных излучений;

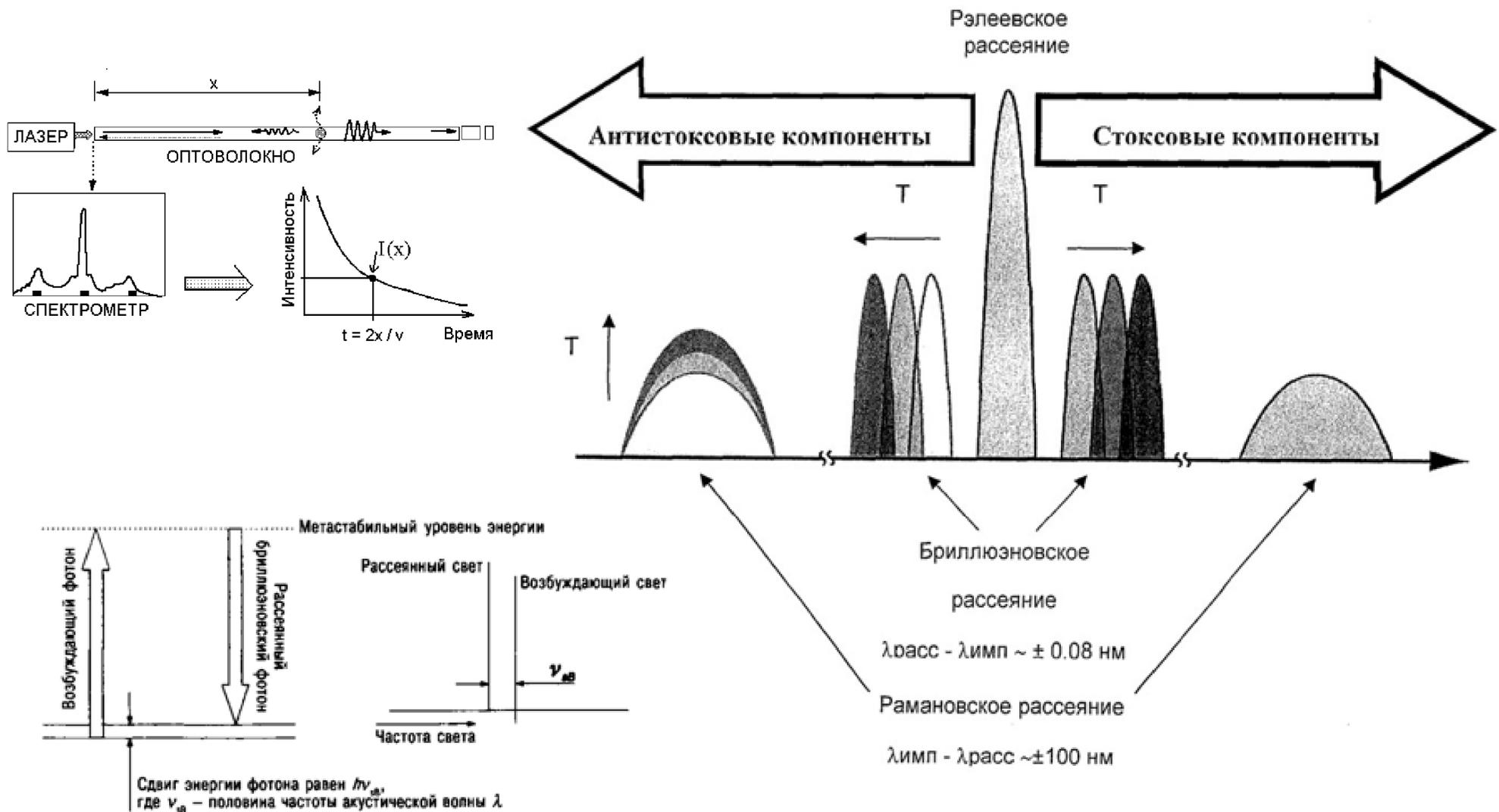
## 5. Спектральные преобразования

### ○ Датчик на брэгговской решетке



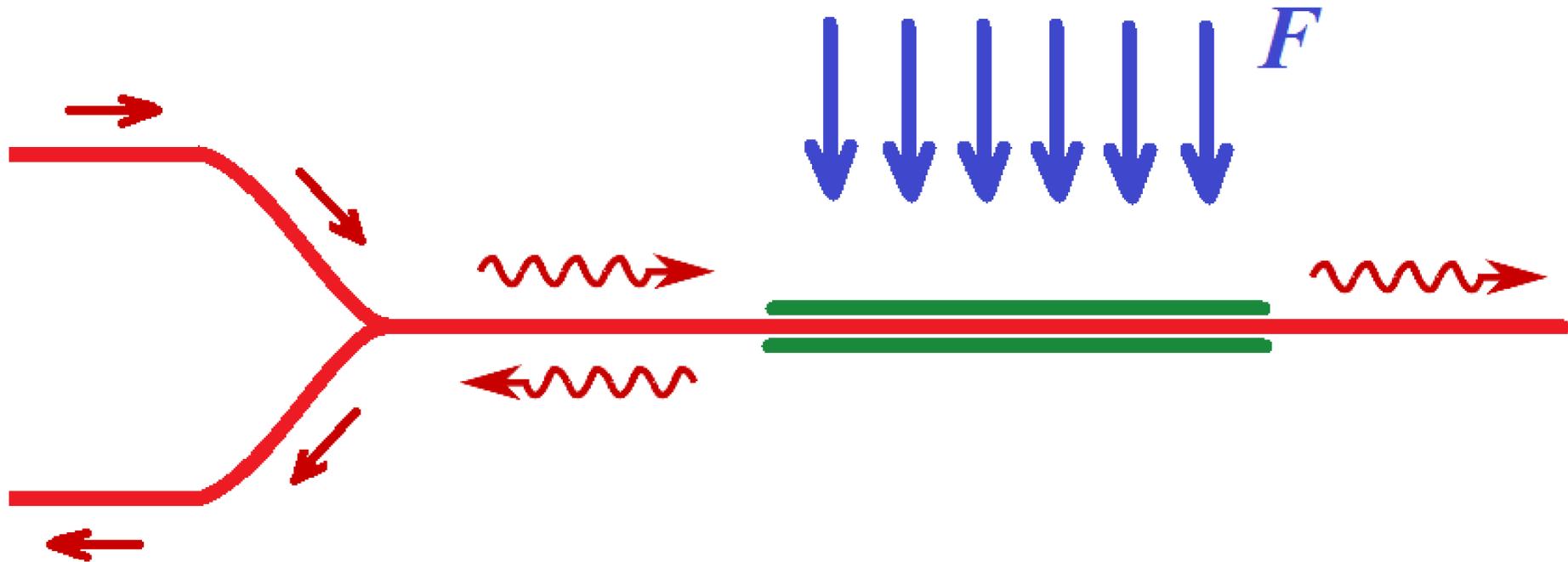
## 5. Спектральные преобразования

### ○ Бриллюэновский датчик (температуры, механических напряжений)



## 5. Спектральные преобразования

### ○ Светогенерационный (люминесцентный) датчик



внешнее воздействие на волокно с люминесцентным покрытием или добавками вызывает

- люминесценцию
- изменяет спектр люминесценции индуцированной излучением от источника света датчика

## 5. Спектральные преобразования

### ○ Светогенерационный (люминесцентный) датчик температуры

---

на торец оптоволоконна нанесено флуоресцентное вещество, которое светится при облучении светом ультрафиолетового спектра; свет проводится оптоволоконном от источника и им же направляется обратно флуоресцентное излучение к фотоприемнику;



изменение температуры выявляется путем вычисления отношения соответствующих значений интенсивности флуоресцентного излучения на длине волны, сильно зависящей от температуры, к интенсивности сигнала на длине волны, слабо зависящего от температуры;

область измеряемых температур датчика находится в пределах от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $0,1^{\circ}\text{C}$ ;

использование волоконно-оптических датчиков, при всей своей привлекательности, позволяет производить измерение температуры только в локальной точке объекта, что несколько сужает область их применения.

## 5. Спектральные преобразования

### ○ Светогенерационный (люминесцентный) датчик

---

#### **Области применения люминесцентных методов измерения температуры.**

Люминесцентные методы измерения температуры нашли широкое применение в различных отраслях науки и промышленности. В частности, волоконно-оптические датчики на основе люминесцентных методов благодаря своим высоким электро- и теплоизоляционным характеристикам, без инерционности, малым габаритам и массе используются в энергетике. На основе таких датчиков созданы системы наблюдения внутри топок тепловых электростанций, устройства для измерения температуры проводов линий передачи и внутри трансформаторов.

В металлургии, химической и нефтеперерабатывающей отраслях зачастую датчики работают в неблагоприятных условиях: повышенные или пониженные температуры, агрессивные среды, сильные электрические и магнитные поля, взрывоопасная атмосфера. Здесь дистанционные волоконно-оптические измерения имеют преимущество перед другими методами измерения температуры.

## 5. Спектральные преобразования

### ○ Выводы

---

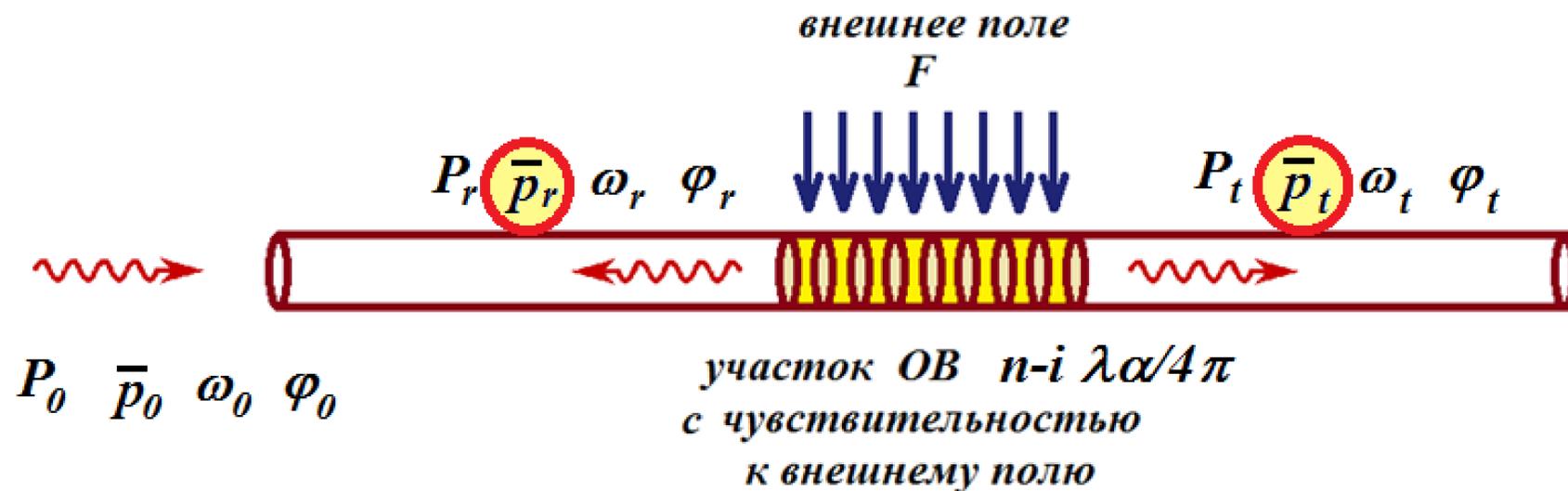
спектральные волоконно-оптические датчики строятся на регистрации

- изменения спектра зондирующего излучения;
- люминесценции, вызванной зондирующим излучением и внешним воздействием

наиболее технологичны и эффективны датчики на брэгговских решетках, которые не только высокочувствительны, но имеют высокую повторяемость параметров и стабильность

## 6. Поляризационные преобразования

### ○ Понятие поляризационных ВОД



воздействие внешнего поля  $F$  вызывает изменение (модуляцию) поляризации проходящего  $p_t$  и возвращаемого излучения  $p_r$

$$\vec{p}_t [\vec{p}_r] = \vec{p}(\vec{F}) \Rightarrow \vec{F} \quad \text{с чувствительностью}$$

$$\eta = \frac{\Delta p}{\Delta F}$$

регистрация изменения поляризации оптического излучения  $p_t[p_r]$  в прямой или обратной схеме измерения позволяет получить значение внешнего поля  $F$  при её демодуляции

## 6. Поляризационные преобразования

### ○ Понятие поляризационных ВОД

основой функционирования поляризационных датчиков является изменение поляризации оптического излучения под воздействием внешнего физического поля

$$\vec{p}_r = \vec{p}_r(F) \quad \vec{p}_t = \vec{p}_t(F)$$

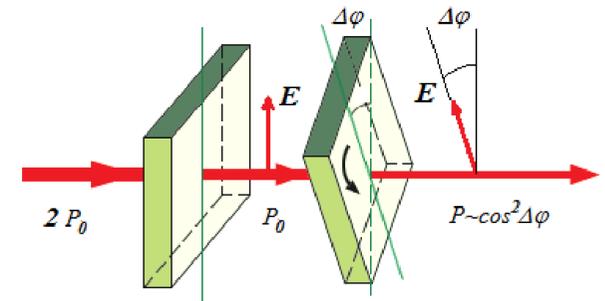
изменения поляризации связываются с такими физическими эффектами как

- электрооптическими линейным эффектом Поккельса и квадратичным эффектом Керра;
- магнитооптическими линейным эффектом Фарадея и квадратичным эффектом Коттон-Мутона ;
- фотоупругостью;

$$P = T \cdot P_0 \cos^2 \Delta\varphi$$

Закон Малюса

- зависимость мощности  $P$  линейно поляризованного света после прохождения через анализатор от угла  $\Delta\varphi$  между плоскостями поляризации падающего света и анализатора, а также от пропускания  $T$  анализатора;



## 6. Поляризационные преобразования

### ○ Датчик магнитного поля

эффект Фарадея

$V_\lambda$  - постоянная Верде

$l$  – длина волокна

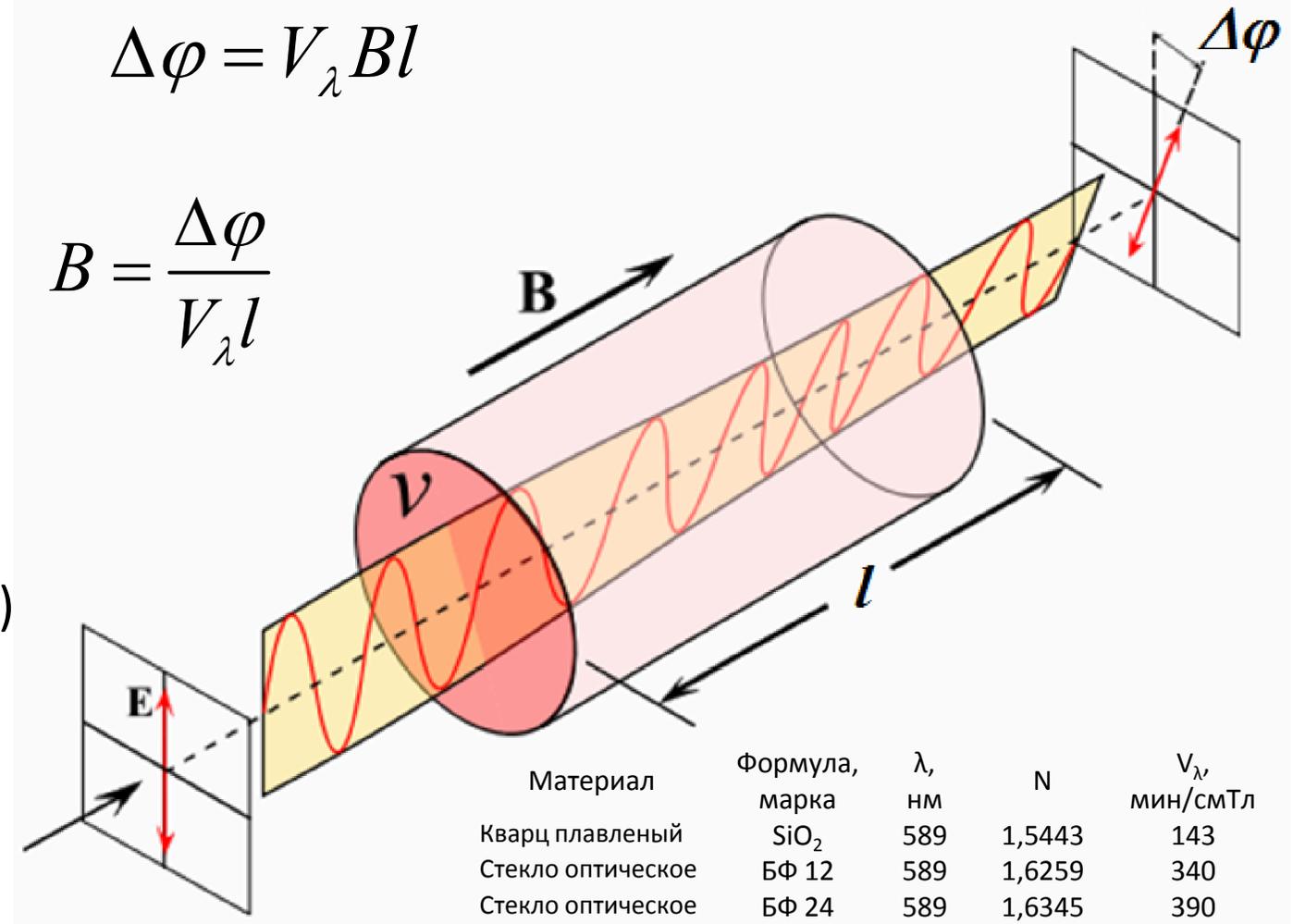
магнитная индукция

постоянная Верде в

плавленом кварце ( $\text{Si}_2\text{O}$ )

0,0143 мин/Э·см

для  $\lambda=0,589$  мкм



## 6. Поляризационные преобразования

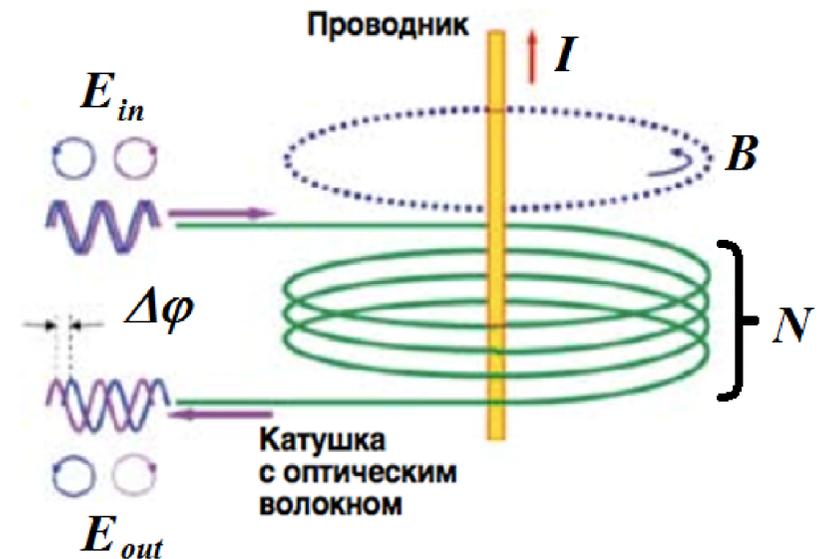
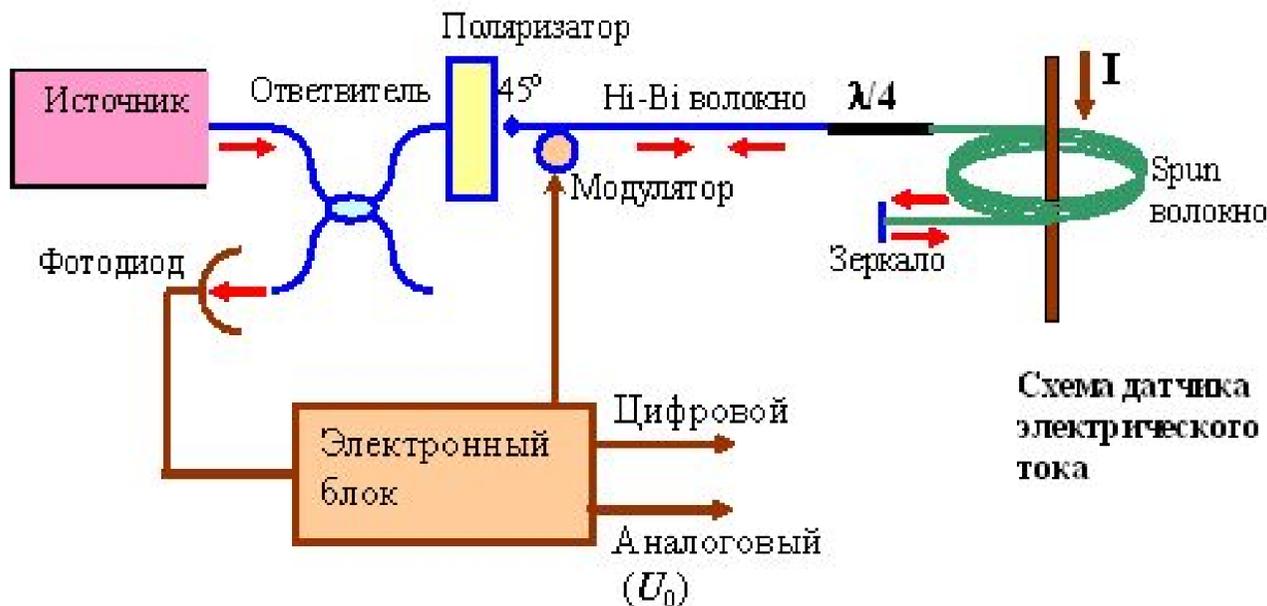
### ○ Датчик электрического тока

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R}; \quad \Delta\varphi = V_\lambda \int_L B dl$$

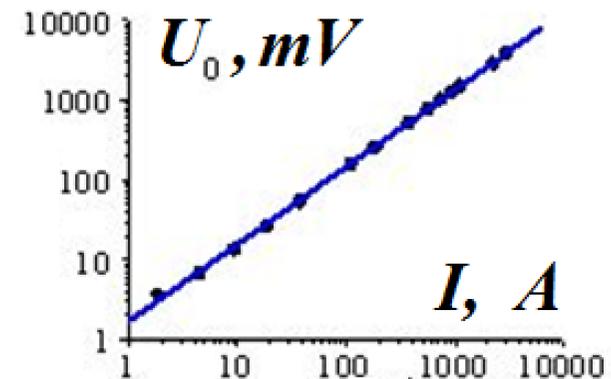
$$P(\Delta\varphi) = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = 4V_\lambda NI$$

<http://fireras.su/229/index.htm>



Выходная характеристика датчика тока



## 6. Поляризационные преобразования

### ○ Датчик электрического поля

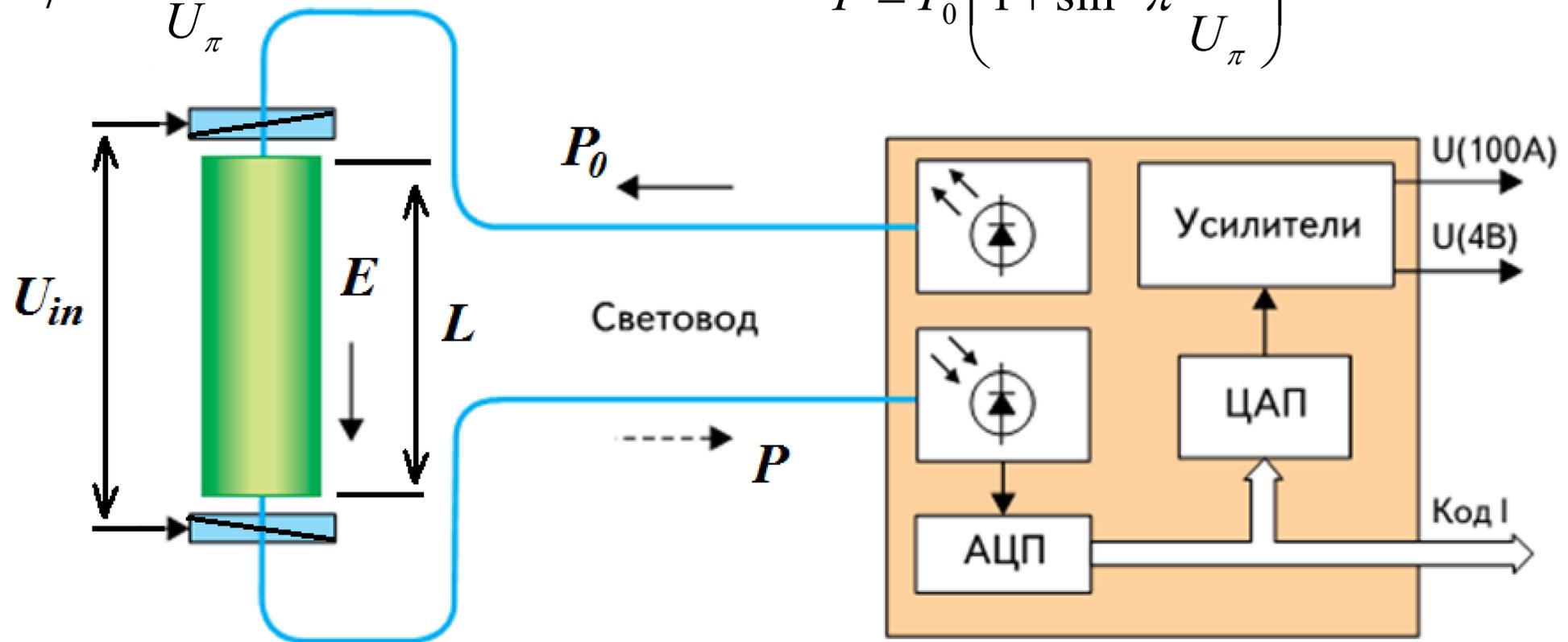
эффект Поккельса (A – постоянная Поккельса)

$U_\pi$  - полуволновое напряжение при котором  $\Delta\varphi=\pi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} A \cdot L \cdot E$$

$$\Delta\varphi = \pi \frac{U_{in}}{U_\pi}$$

$$P = P_0 \left( 1 + \sin^2 \pi \frac{U_{in}}{U_\pi} \right)$$



## 6. Поляризационные преобразования

### ○ Выводы

---

поляризационные волоконно-оптические датчики строятся на основе

электрооптических и магнитооптических эффектов, которые позволяют проводить измерения электромагнитных полей;

фотоупругого эффекта, который позволяет проводить измерения механических напряжений;

они требовательны к параметрам зондирующего излучения и к линии передачи данных

## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ **Понятие**

---

распределенные измерительные волоконно-оптические сети

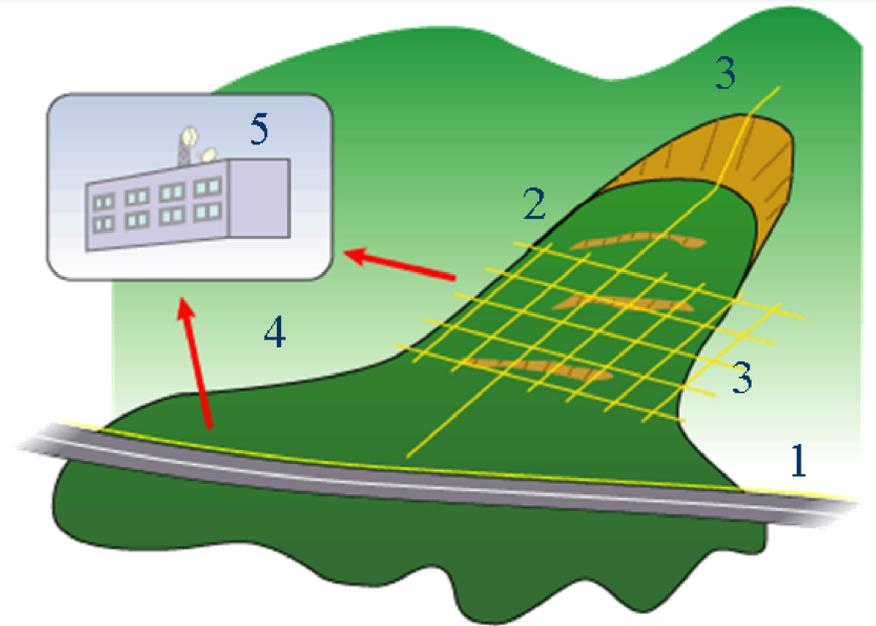
- предназначены для восстановления многомерных параметров физических полей в реальном времени с пространственной локализацией относительно объекта исследований, т.е. для формирования «чувствительных поверхностей и объемов»;
- представляется в виде волоконно-оптической кабельной инфраструктуры, пространственно охватывающей объект исследования и использующей для измерения параметров окружающих физических полей отклик оптического волокна в каждой своей точке;
- обладают возможностью проводить полный мониторинг физических полей на объекте в пространстве и во времени;
- применяются в робототехнике, в авиационных, космических, морских, автомобильных конструкциях, судостроении, строительных сооружениях, технологических объектах, сейсмических и других исследованиях;

## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

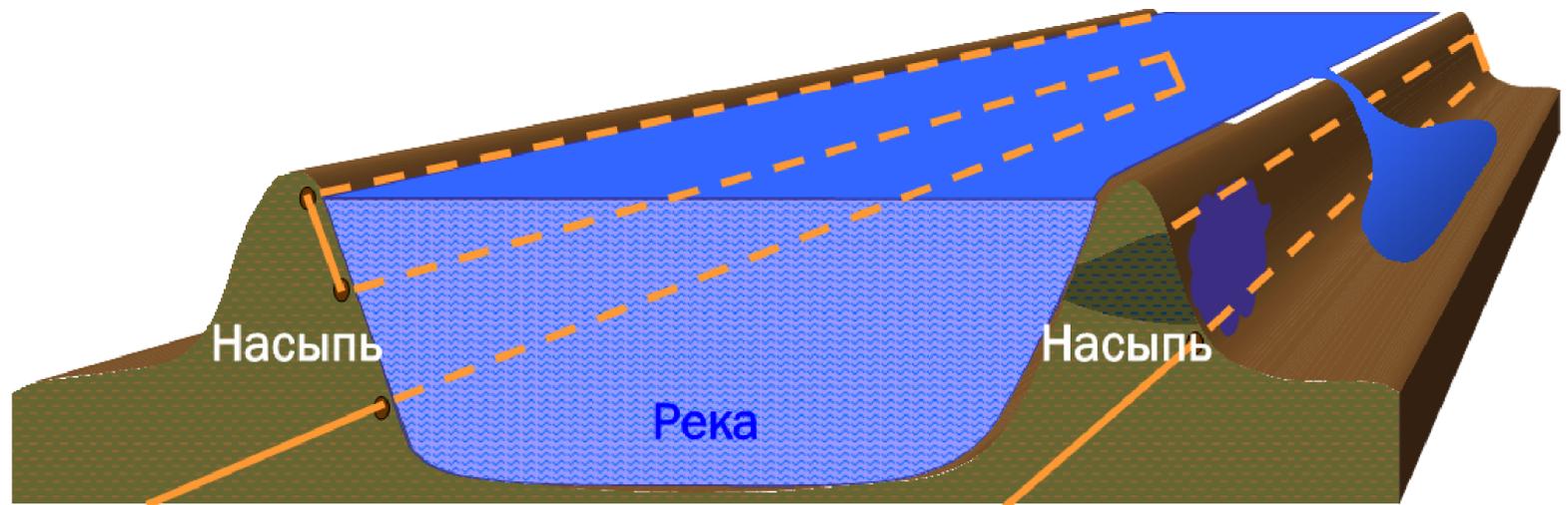
### ○ Волоконно-оптические системы мониторинга объектов:

#### ❖ оползня над автомобильной трассой

- 1 – трасса, 2 – опасный участок склона (оползень) над трассой,
- 3 – распределенная сенсорная оптоволоконная сеть,
- 4 – измерительная информация,
- 5 – офис системы мониторинга



#### ❖ насыпи рек и дамб



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

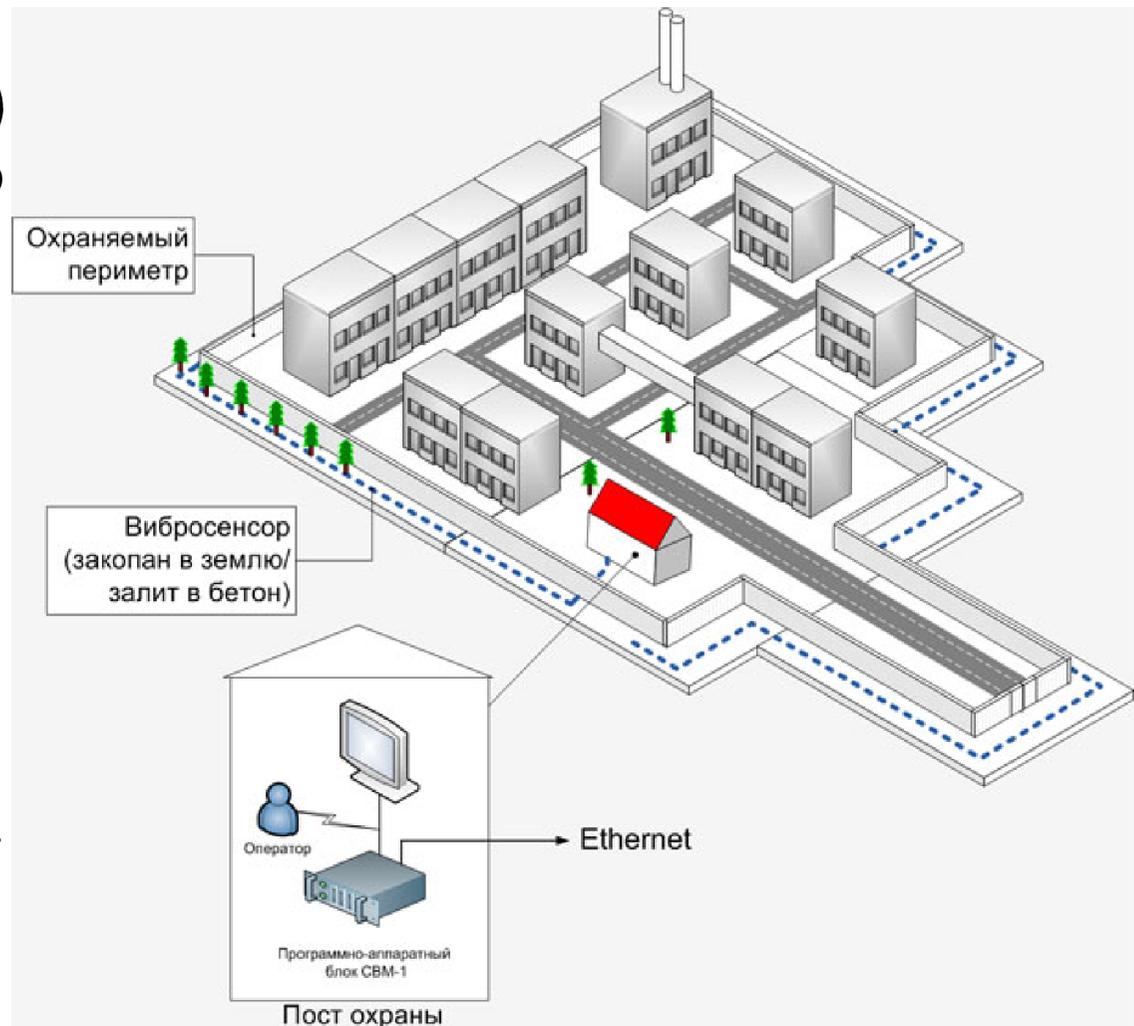
### ○ Волоконно-оптические системы охраны периметра

оптоволоконная распределенная система вибромониторинга и охраны периметра

(периметральная система охраны) предназначена для непрерывного контроля, регистрации и визуального отображения в реальном времени вибросостояния и целостности контролируемого объекта.

существует несколько реализаций:

- ✓ волоконно-оптическая система охранной сигнализации периметра ВОРОН® (ООО «Прикладная радиофизика» Россия)
- ✓ волоконно-оптическая система охраны «Сова» (Ассоциация «Еврокабель» Россия)
- ✓ ООО «ОПТОЛЕКС», ООО «КБСТ ИМТО» и др.



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ Волоконно-оптические системы охраны периметра

когерентный рефлектометр ДУНАЙ

(ООО «Т8» <http://www.t8.ru>)

распределенный датчик вибрации и акустических воздействий на основе

когерентного

рефлектометра

для систем

безопасности

по охране

распределенных

объектов

(трубопроводов,

кабельной

инфраструктуры

и др)

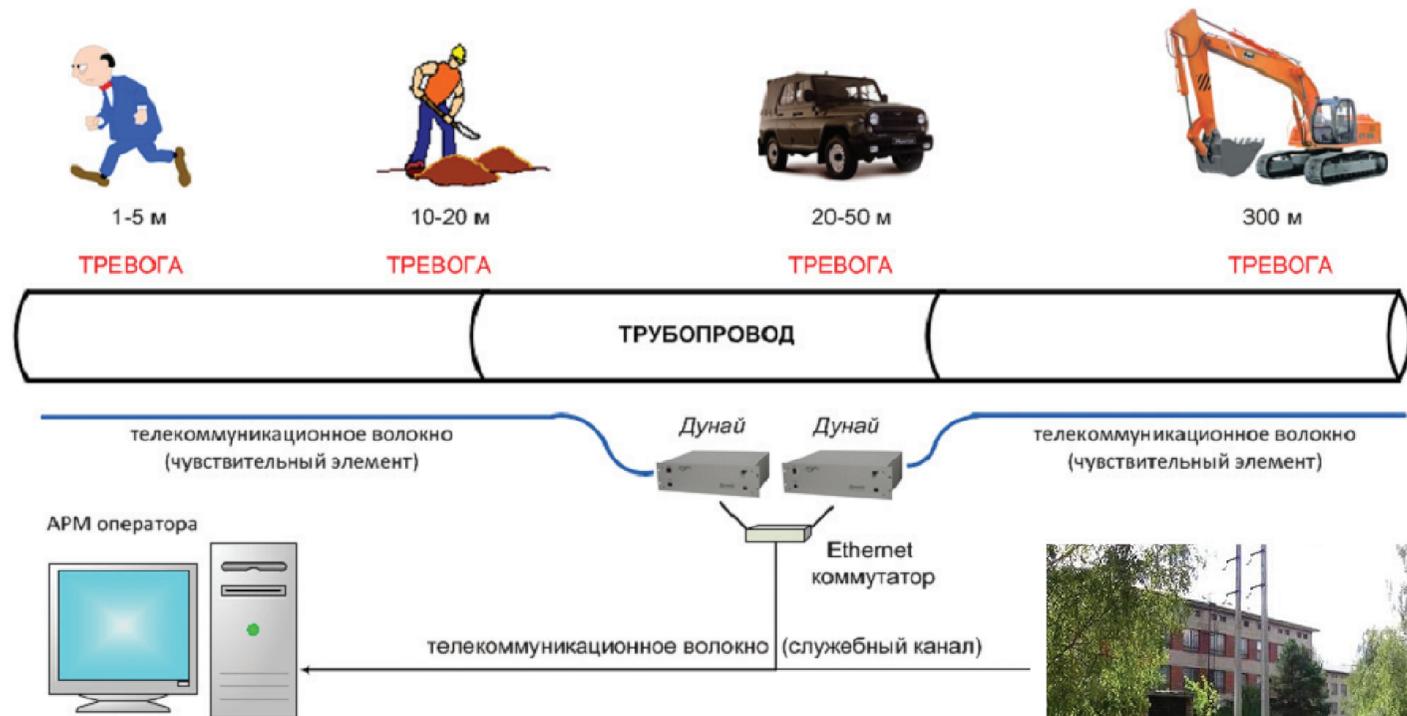
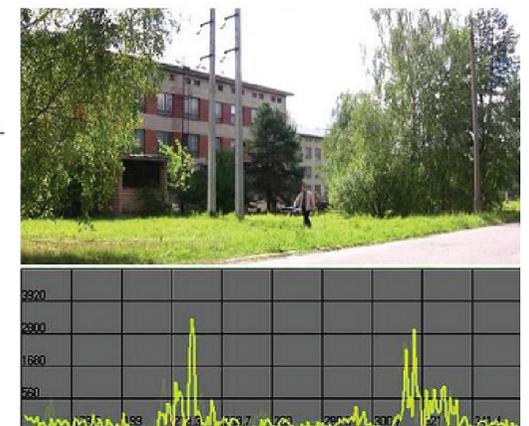


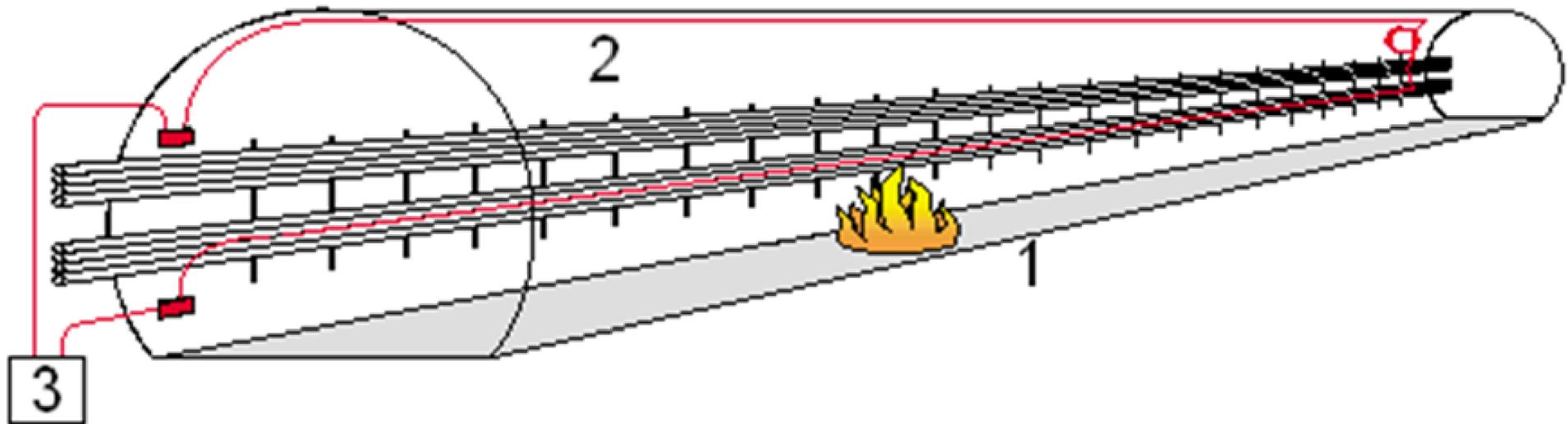
Иллюстрация работы распределенного датчика  
вибрации сигнала от идущего человека



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ Волоконно-оптические системы охранно-пожарной сигнализации

автомобильного туннеля: 1 – место возгорания в туннеле, 2 – сенсорное оптоволокно, 3 – программно-аппаратный блок контроля.

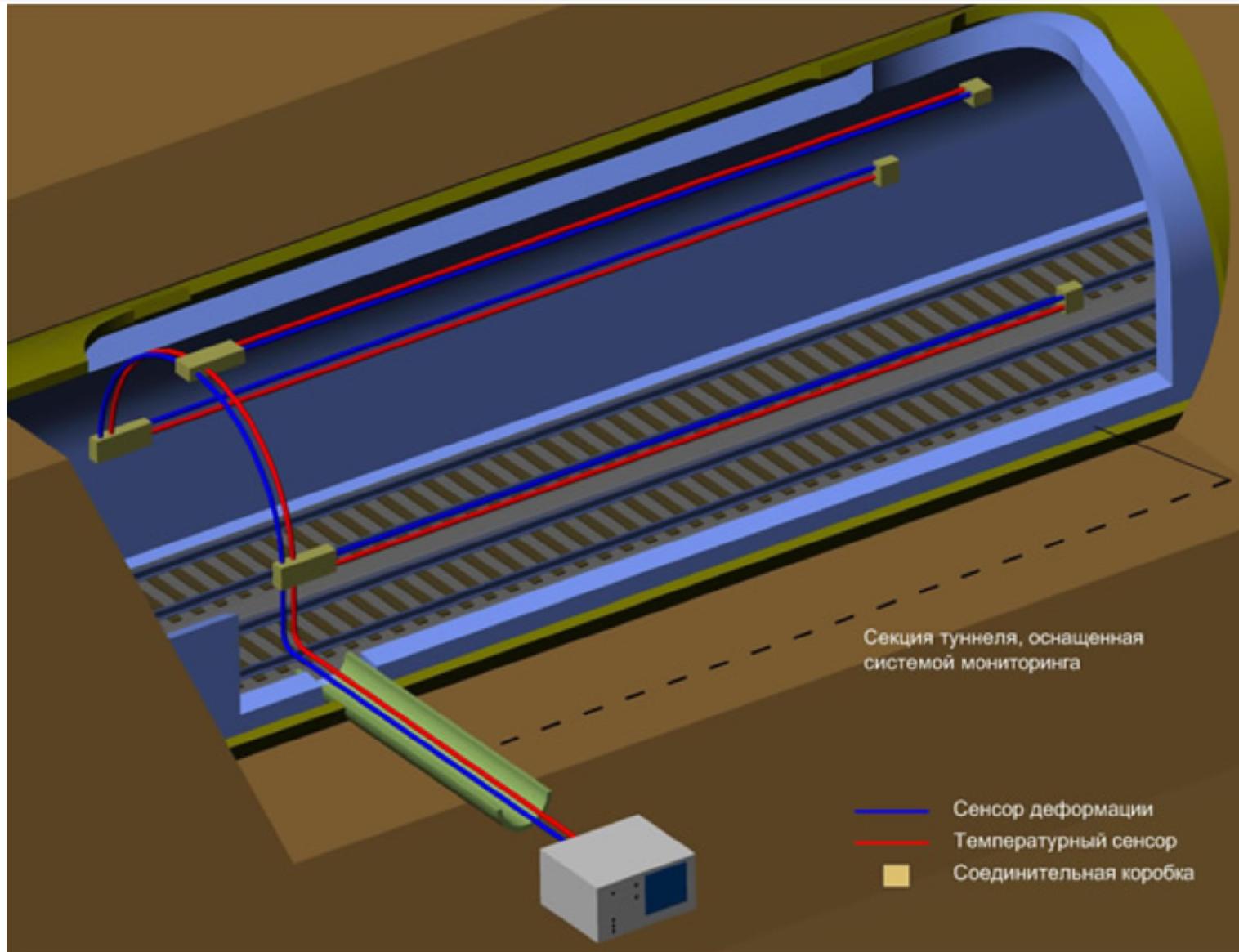


работа датчика основана на рассеянии Мандельштама-Бриллюена и комбинационном рассеянии зондирующего света, которые зависят от температуры окружающей оптическое волокно среды.

существует несколько реализаций для пожарной сигнализации и для термометрии скважин и т.д.

## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ ВОИИС предупреждения опасных процессов в туннелях



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ Волоконно-оптические информационно-измерительные системы

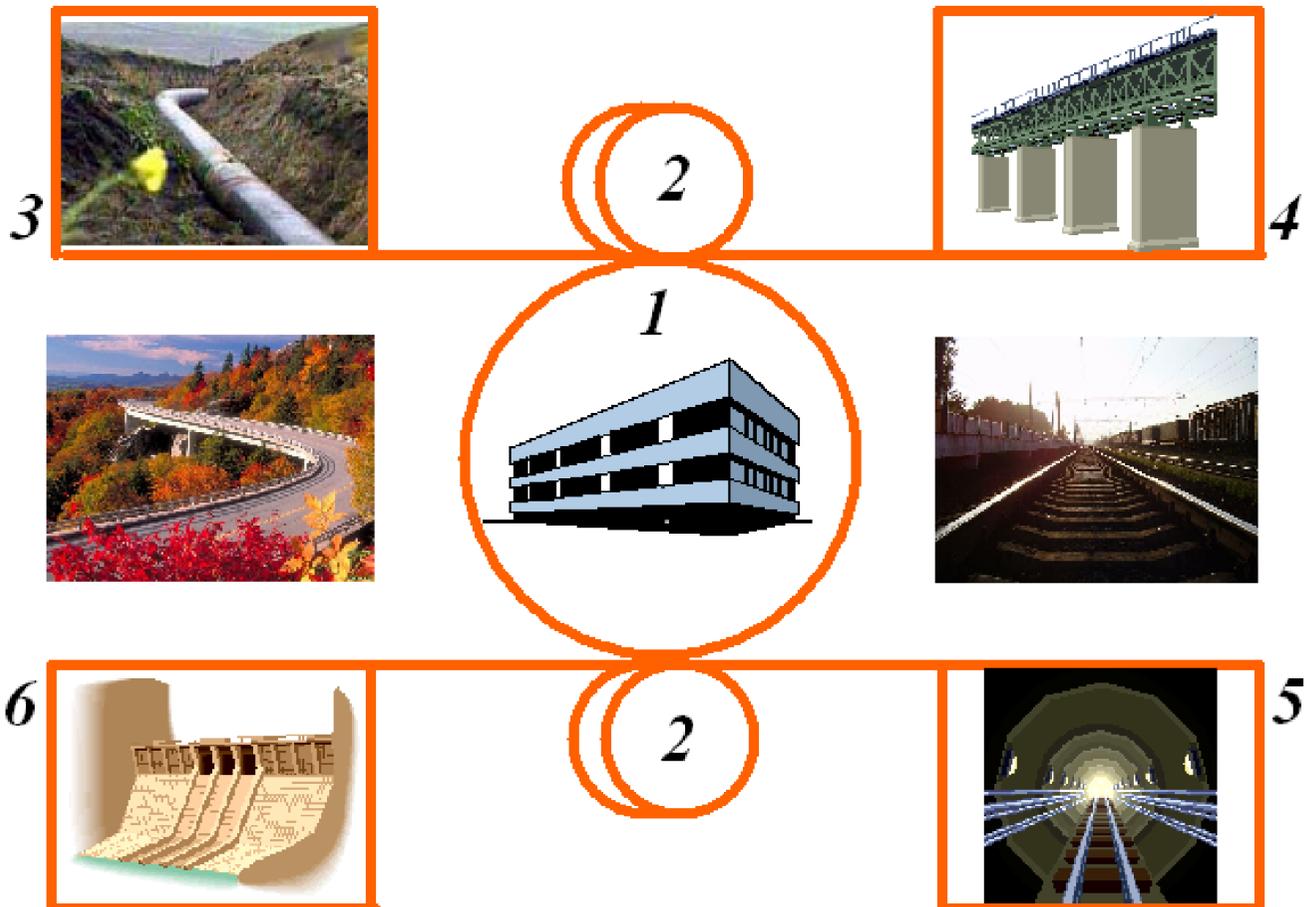
практика мониторинга инженерно-технических объектов на основе распределенной волоконно-оптической сенсорной системы:

1 – офис системы мониторинга,

2 – коммуникационный и сенсорный оптический кабель,

3-6 – объекты мониторинга –

трубопровод, мост, полотно железной дороги, туннель, плотина, автомобильная дорога.



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ Волоконно-оптические информационно-измерительные системы

практика контроля доступа и сохранности объектов на основе распределенной волоконно-оптической сенсорной системы: 1 – система контроля, 2 – коммуникационный и сенсорный оптический кабель,

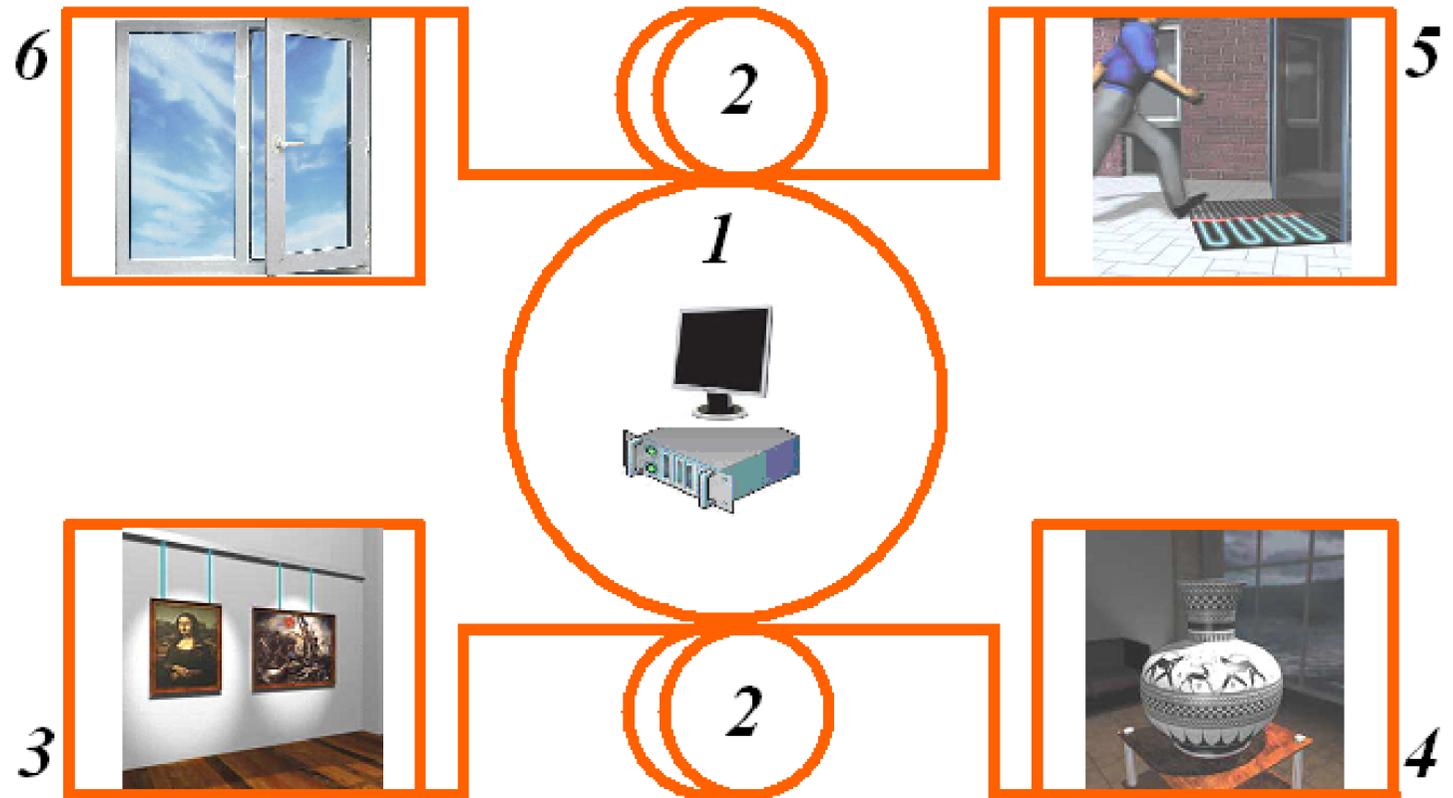
3-6 – объекты контроля –

картина в музее,

музейный экспонат,

доступ в здание,

проникновение через окно.



## 7. Волоконно-оптические измерительные системы

### ○ Выводы

---

основные применения волоконно-оптических измерительных систем

- мониторинга состояния инфраструктурных объектов
- мониторинга распределенных динамических деформаций
- технического мониторинга строительных сооружений
- мониторинг распределения температуры
- сейсмического мониторинга
- мониторинга нефтегазовых трубопроводов
- мониторинга мостов, дамб, плотин и насыпей
- мониторинга коррозии/эрозии эксплуатируемого трубопровода
- мониторинга линий электропередач
- обнаружения возгорания
- обнаружения трещин
- построения смарт структур и мониторинг состояний конструкций
- систем безопасности
- виброакустического мониторинга

## 8. Преимущества волоконно-оптических измерений.

### ○ Преимущества

---

**Интегральность**, т.е. создание измерительных устройств с высокой степенью интеграции базовых элементов датчика в одном модуле малого объема. В модуль встраиваются элементы предварительной аналоговой обработки сигнала, преобразования сигнала в цифровой вид. Наибольшего прогресса в этом направлении достигли полупроводниковые, электрические и другие датчики, построенные на основе микроэлектроники. Подобные устройства выполняются в миниатюрном, одномодульном виде с электрическими выводами, сопрягаемыми с существующими устройствами мониторинга.

**Многофункциональность**, т.е. комбинирование в одном измерительном устройстве несколько датчиков или использование одного универсального датчика измеряющего несколько параметров. Комплексное измерение всех основных параметров технологических процессов, работы технологического устройства позволяет повысить надежность и устойчивость работы. Волоконно-оптические датчики во многом более подходят к подобным решениям вследствие использования в них оптоволокна как чувствительный элемент с измерением нескольких величин на разных участках и как линию передачи информации.

**Распределенность**, т.е. измерение параметров по всему пространству с течением времени в технологической среде одним датчиком, пространственно распределенным по области контроля. Необходимость мониторинга по всему пространству связывается со сложностью многих процессов, с существованием градиентных условий изменяющихся со временем и локальным формированием динамических неустойчивостей приводящих к разрушениям. Это направление также имеет одно из наилучших решений в волоконно-оптических датчиках.

**Интеллектуальность**, т.е. обработка полученной информации, выработка простейших решений в точке измерения и передача контрольных данных в систему общего мониторинга. Такая работа датчика может значительно повысить быстродействие измерительных систем, их надежность. Интеллектуальность датчика достигается включением в его структуру микропроцессора. Такое решение, в настоящее время, дает преимущества нейронным измерительным сетям.

## 8. Преимущества волоконно-оптических измерений.

### ○ **Преимущества**

---

измерительные преимущества

- высокая чувствительность к измеряемому параметру;
- многофункциональность измерения;
- распределенность измеряемой величины;
- отсутствие электрических цепей;
- пассивность измерения;
- малое энергопотребление;
- устойчивость к внешним воздействиям;

## 8. Преимущества волоконно-оптических измерений.

### ○ Преимущества

---

волоконно-оптические системы измерения и мониторинга имеют перед другими системами следующие преимущества

**технические:** высокая чувствительность к измеряемому параметру, отсутствие электрических цепей, пассивность измерения, устойчивость к внешним воздействиям;

**технологические:** единая для всех элементов технология производства, которая строится на волоконно-оптической технологии, широко применяемой в производстве волоконно-оптических линиях связи;

**экономические:** малые весогабаритные размеры, малое энергопотребление, высокая технологичность, низкая стоимость;

**эксплуатационные:** помехозащищенность от электромагнитных полей, долговечность, надежность, наличие широкого парка оборудования для обслуживания, совместимого с оборудованием для волоконно-оптических линий связи.

# Темы для обсуждения по лекциям 5-6

## «Волоконно-оптические преобразователи»

Преобразование света в оптических волокнах.

Волоконно-оптические измерения.

Амплитудные преобразования.

Фазовые преобразования.

Спектральные преобразования.

Поляризационные преобразования.

Волоконно-оптические измерительные системы.

Преимущества волоконно-оптических измерений.

Волоконно-оптические датчики и системы в обеспечении безопасности объекта информатизации.