

Брэгговская решетка – ключевой элемент современной фотоники

Бутов Олег Владиславович, д.ф.-м.н.

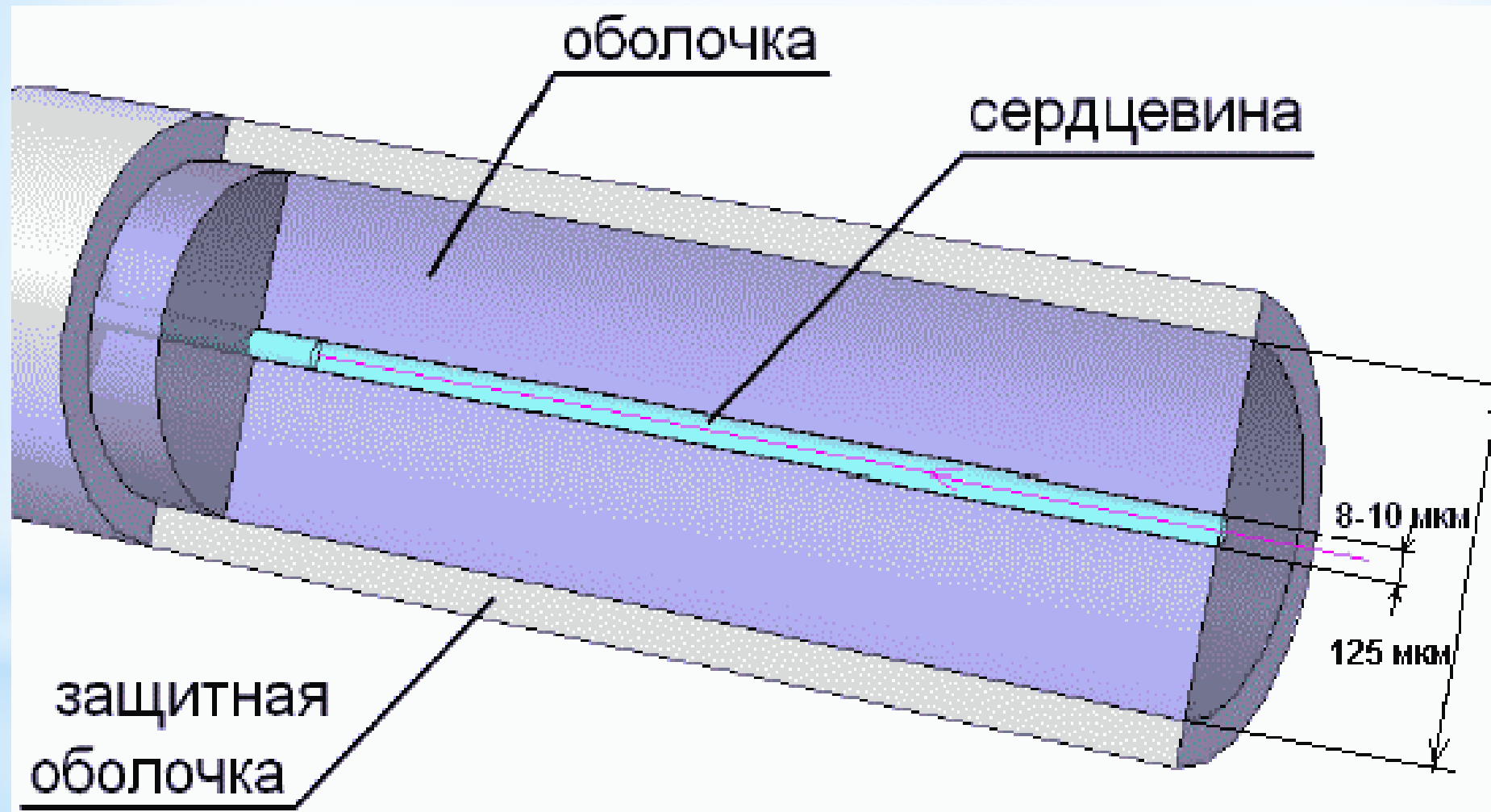
зам. директора по научной работе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

МФ'24, Сколково, г. Москва

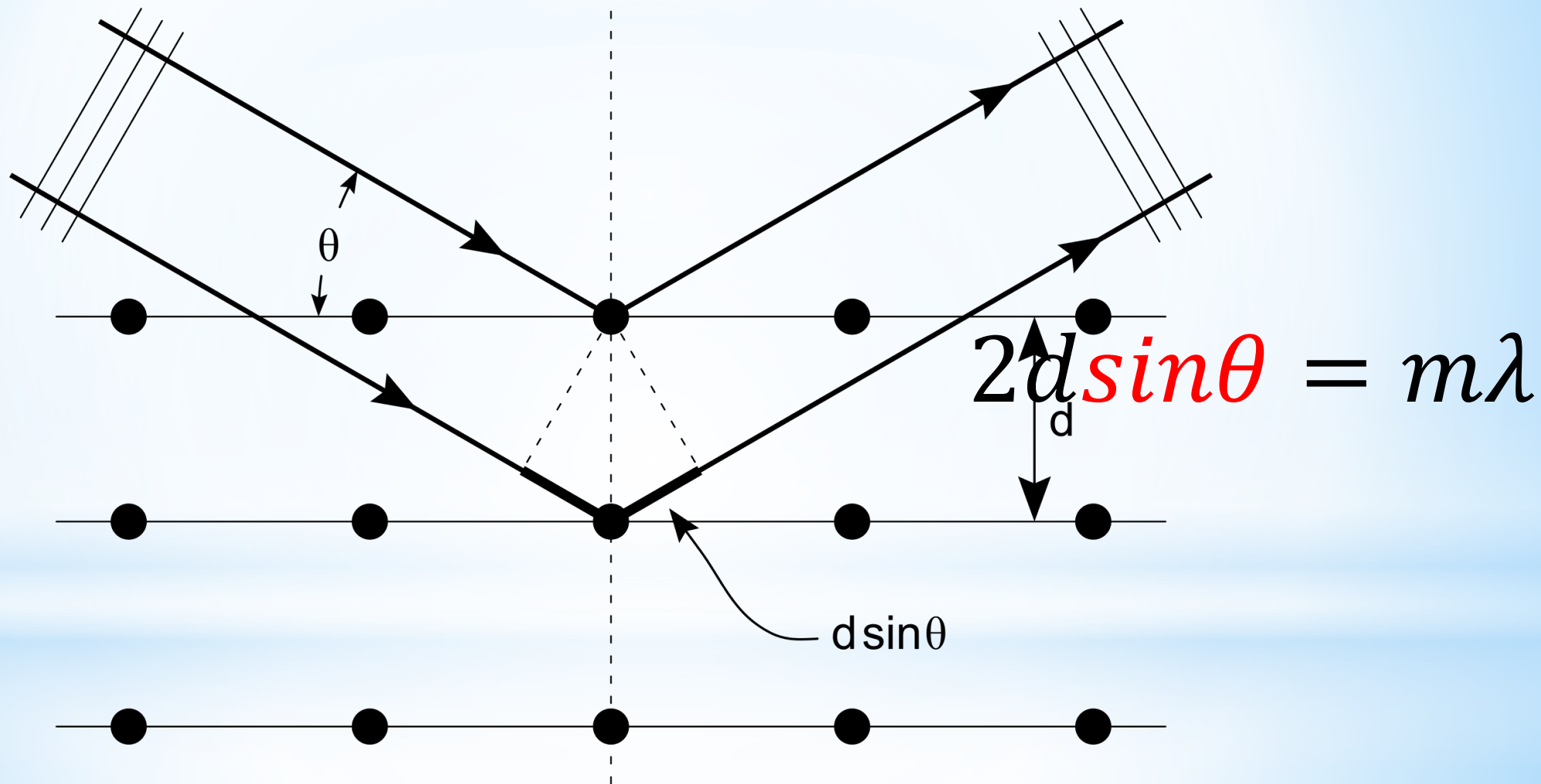
План

- Волоконная брэгговская решетка
- История и технология
- Фильтры, селекторы и сенсоры
- Решетки в когерентной рефлектометрии
- Волоконный лазер
- Наклонные волоконные брэгговские решетки
- Решетки в экстремальных условиях

Волоконный световод



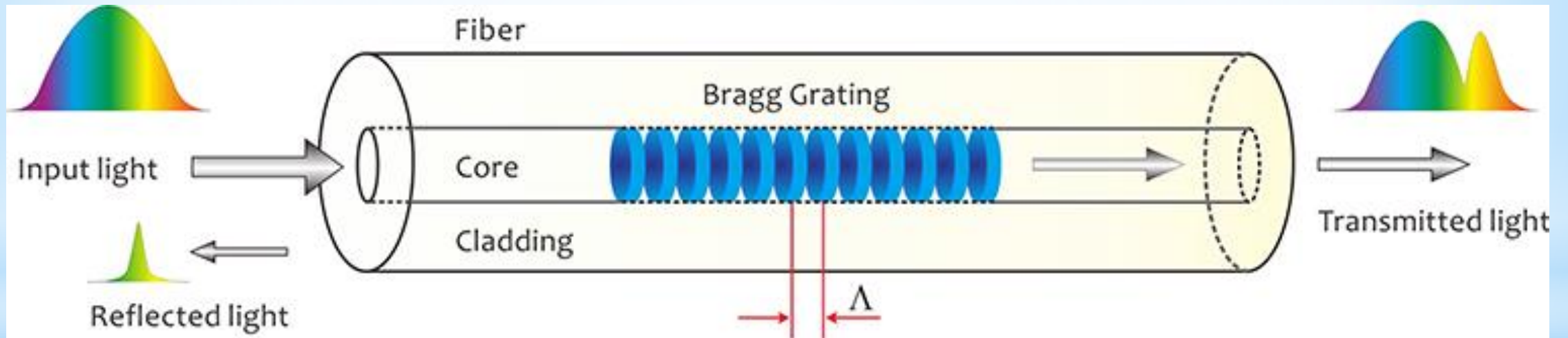
Закон Брэгга-Вульфа



Волоконная брэгговская решетка (ВБР)

Fiber Bragg grating (FBG)

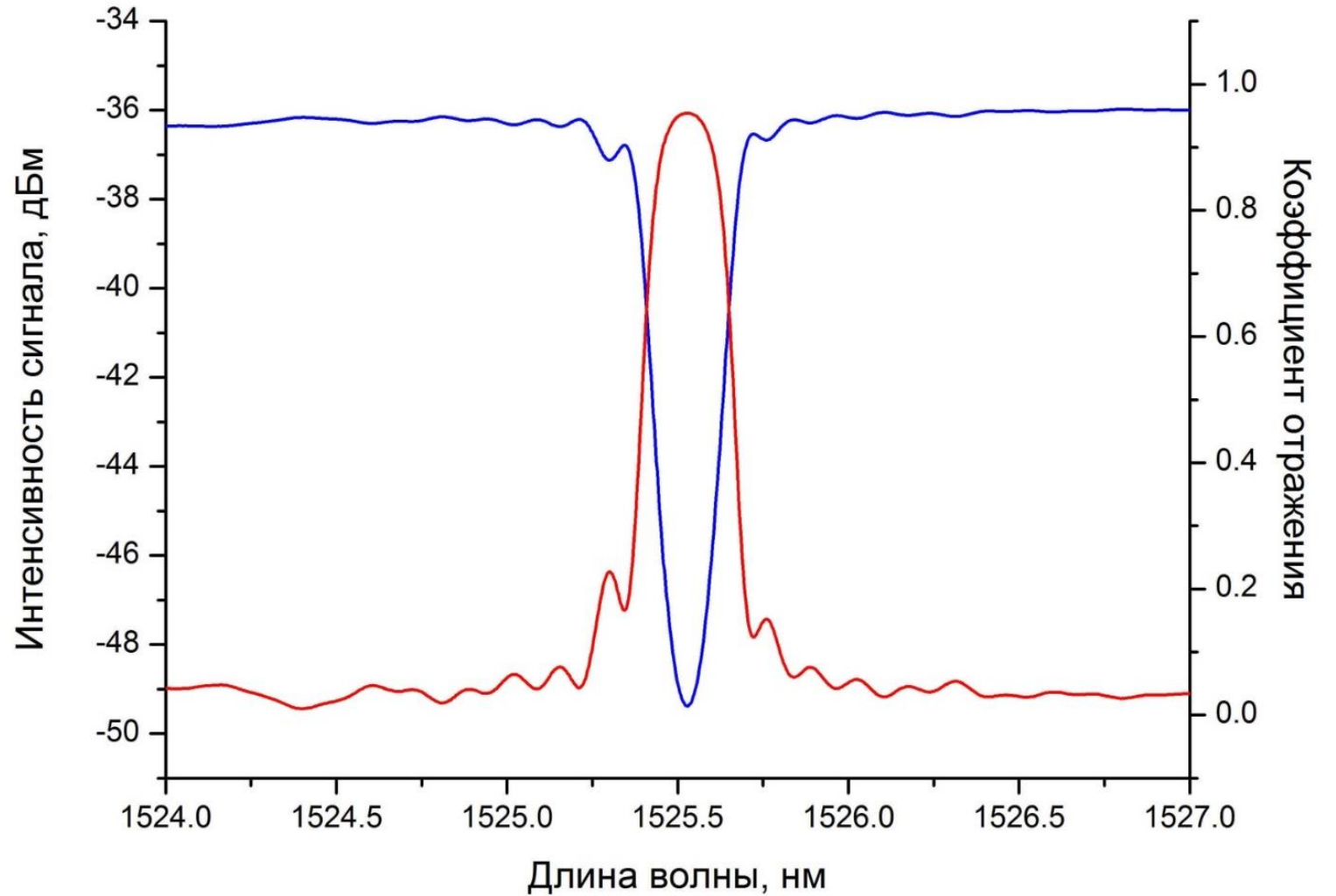
$$2d \sin \theta = m\lambda \rightarrow 2\Lambda n = m\lambda$$



Волоконная брэгговская решетка (ВБР)

Fiber Bragg grating (FBG)

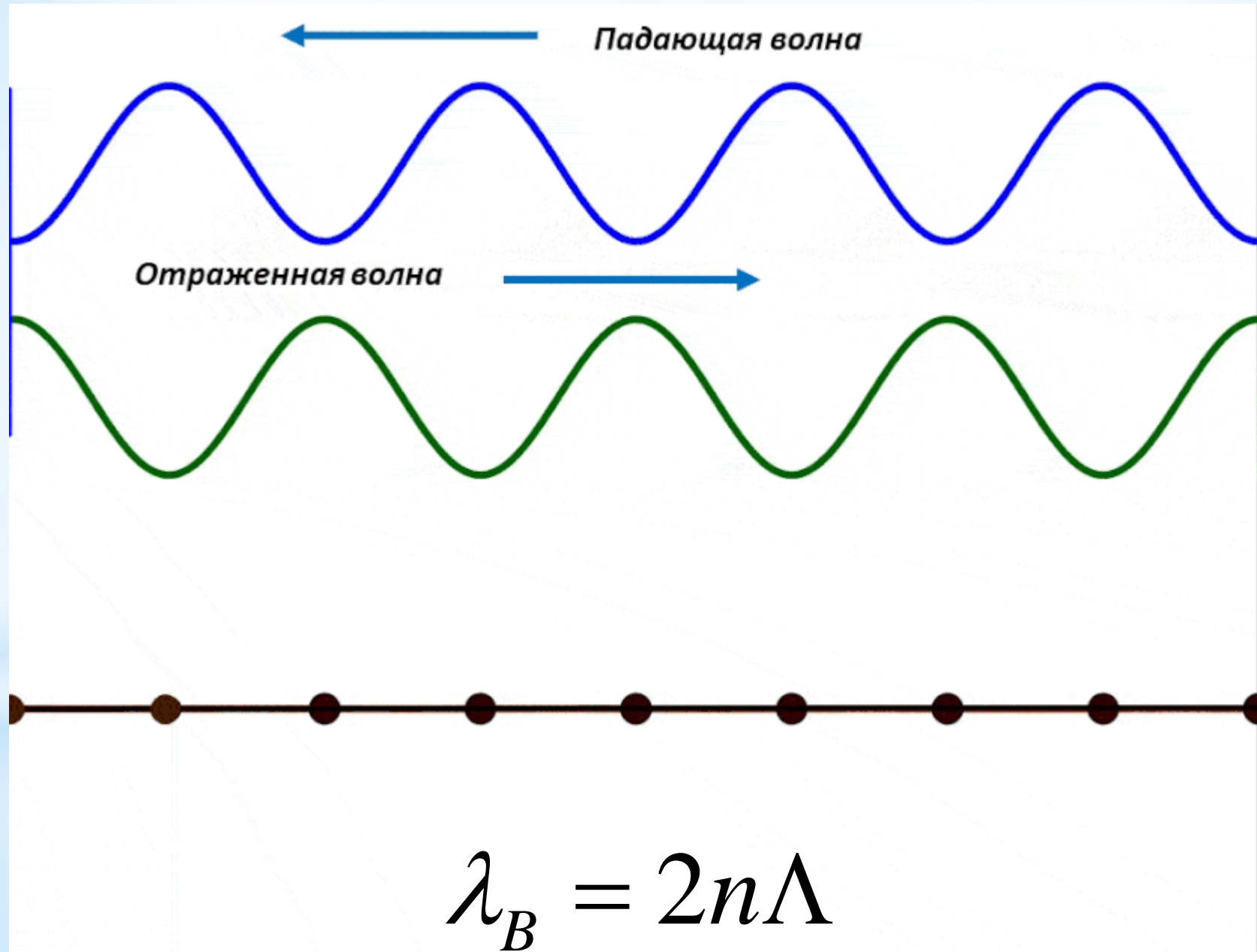
$$\lambda_B = 2n\Lambda$$



Волоконная брэгговская решетка (ВБР) – один из важнейших элементов современной фотоники

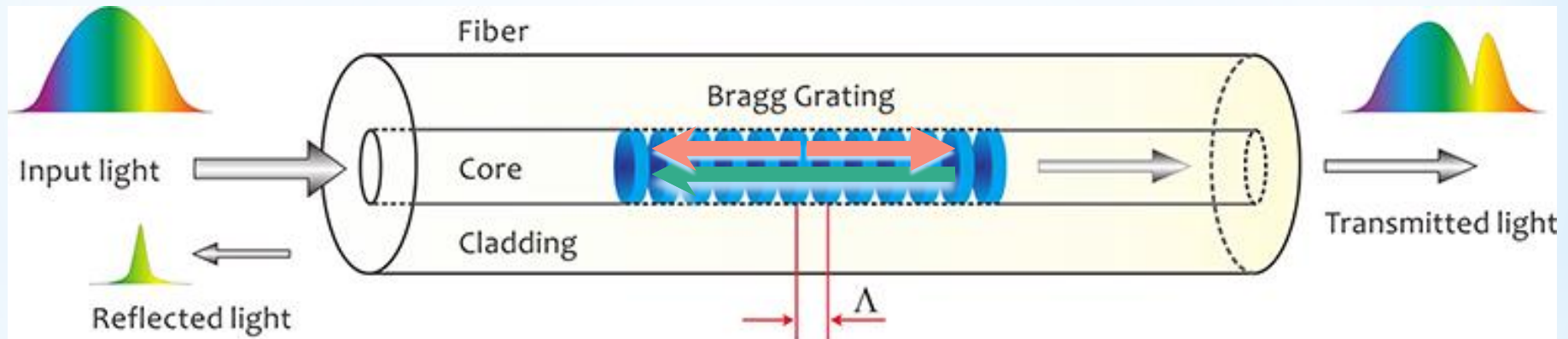
- Оптические волоконные фильтры, селекторы оптических каналов;
- Датчики физических величин;
- Зеркала для волоконных и полупроводниковых лазеров;
- Дисперсионные элементы, в т.ч. в СРА-схемах.

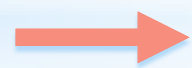
Первая брэгговская решетка



Волоконная брэгговская решетка

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$



 $\mathbf{k}_\lambda = \mathbf{i}2\pi n / \lambda_B$

 $\mathbf{K}_{Br} = \mathbf{j}2\pi / \Lambda$

Интерферометр, интерференция

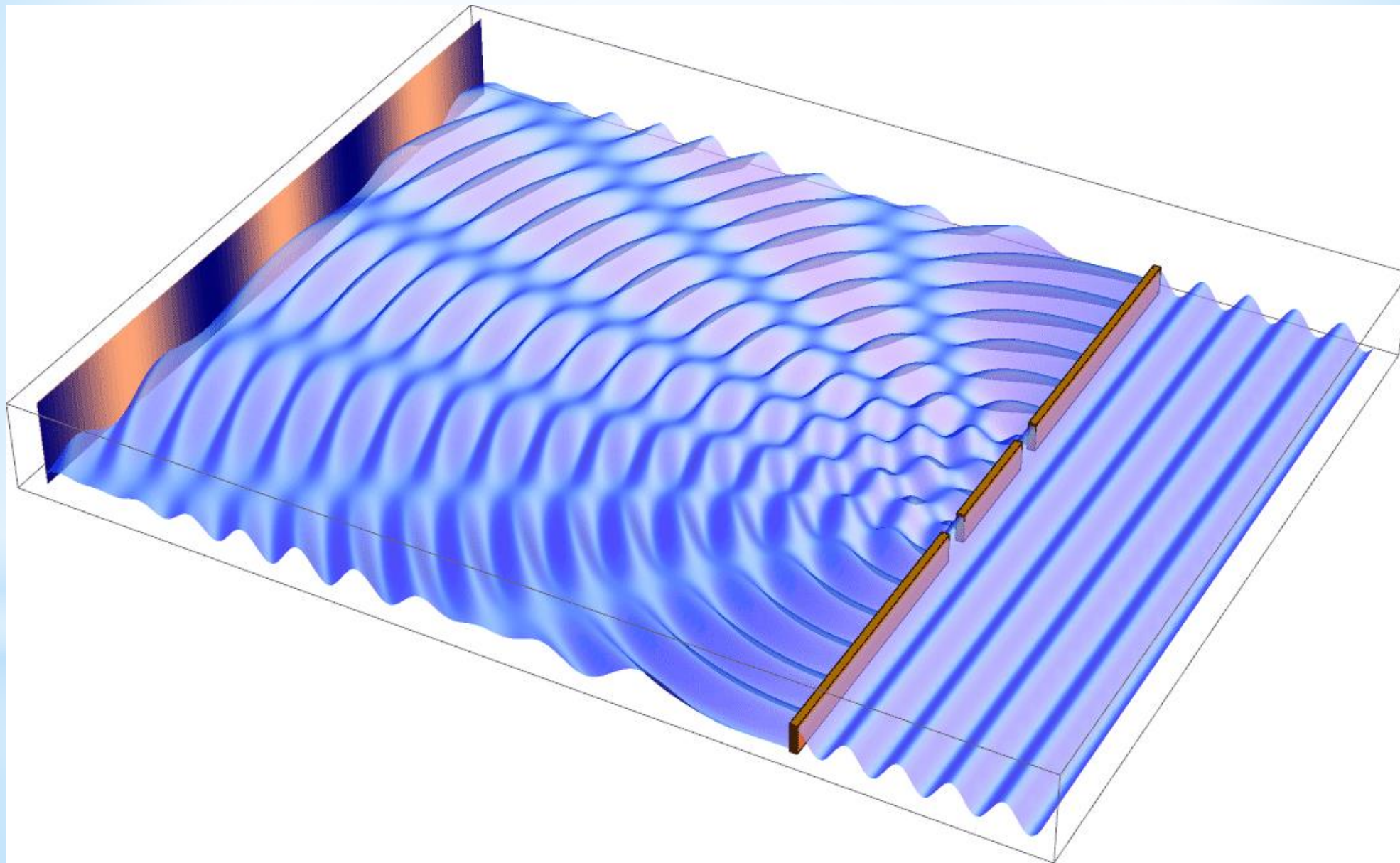


Схема записи брэгговской решетки с помощью интерферометра Маха-Цендера и УФ-излучения

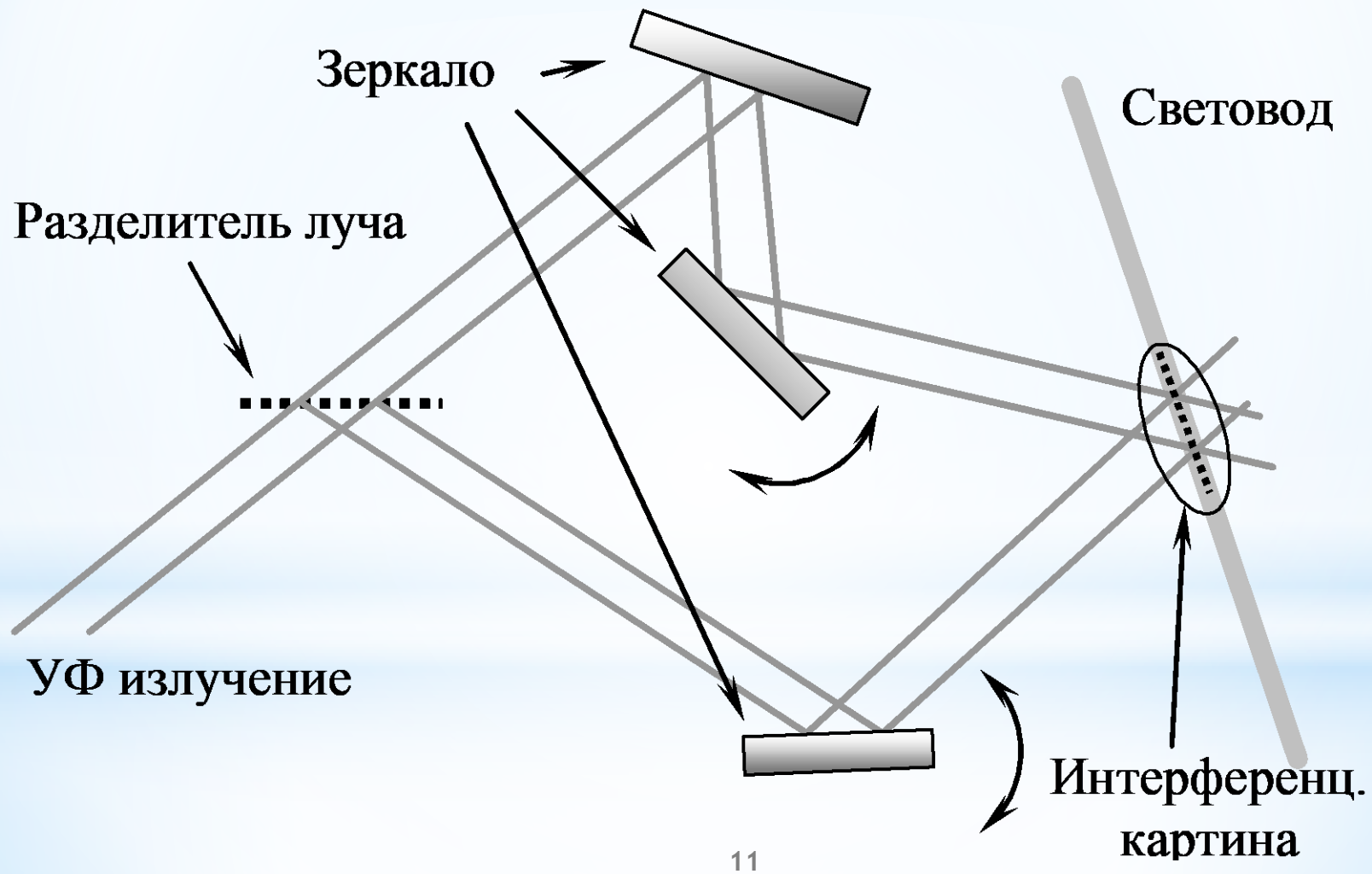


Схема записи брэгговской решетки с помощью интерферометра Ллойда и УФ-излучения

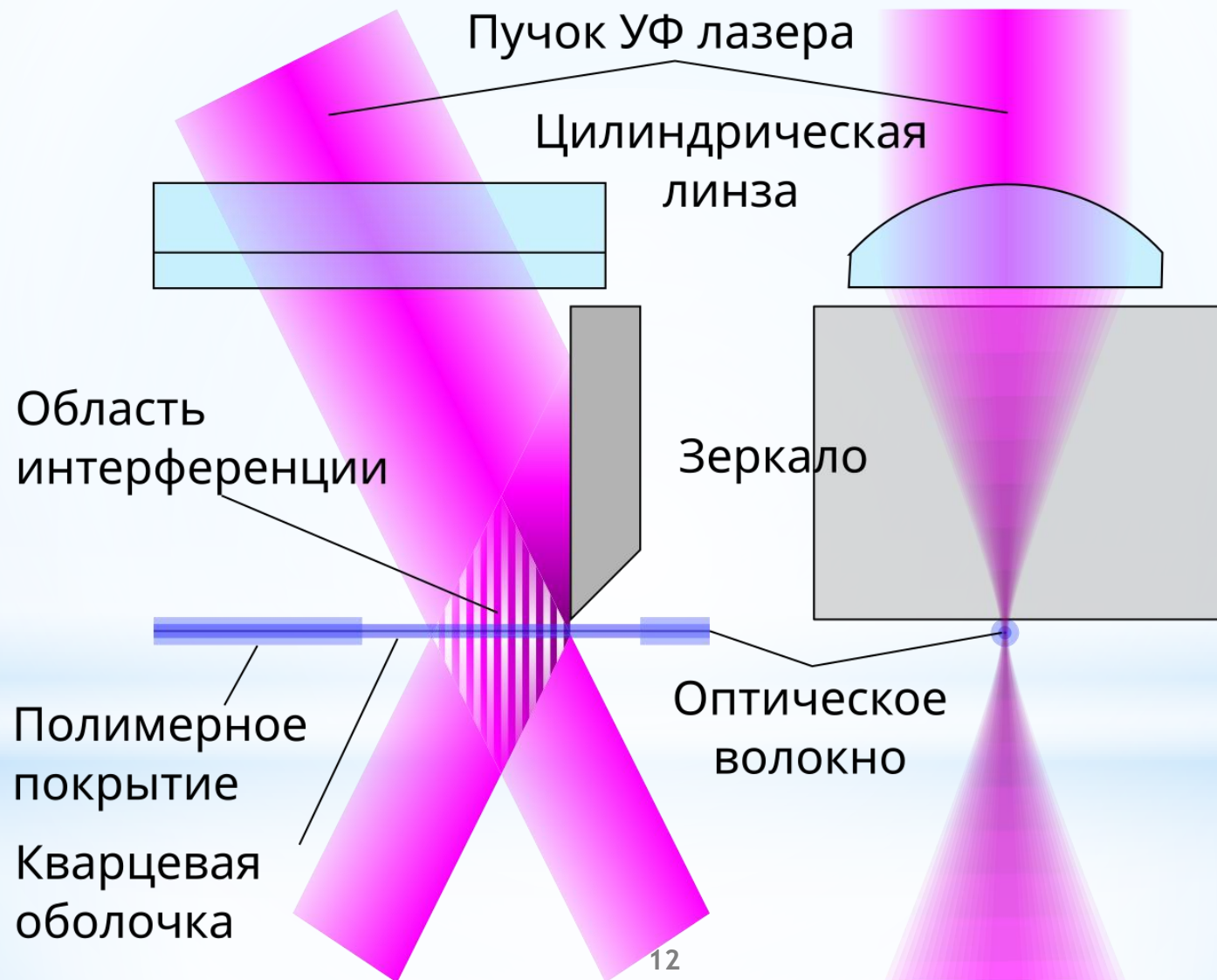
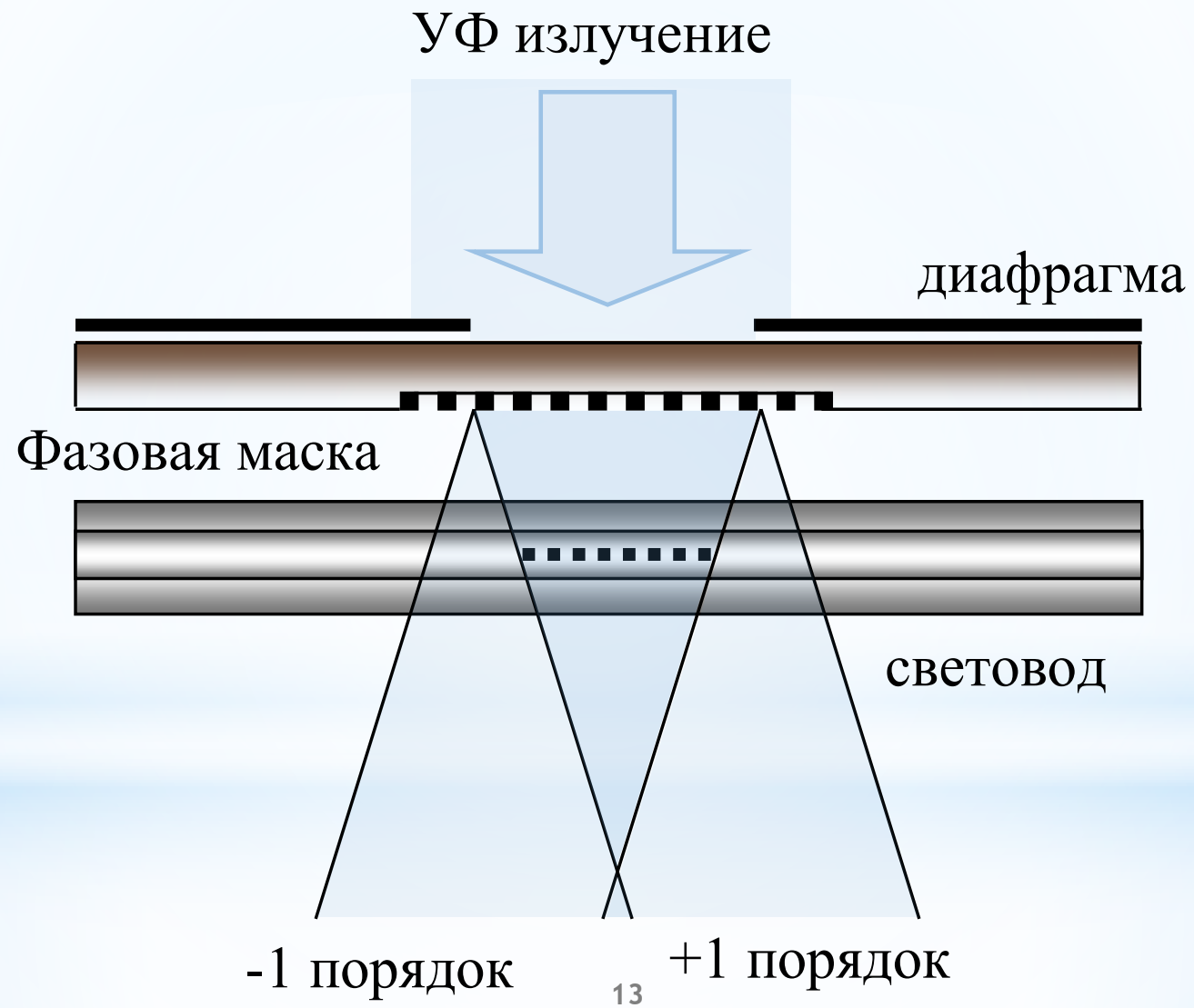
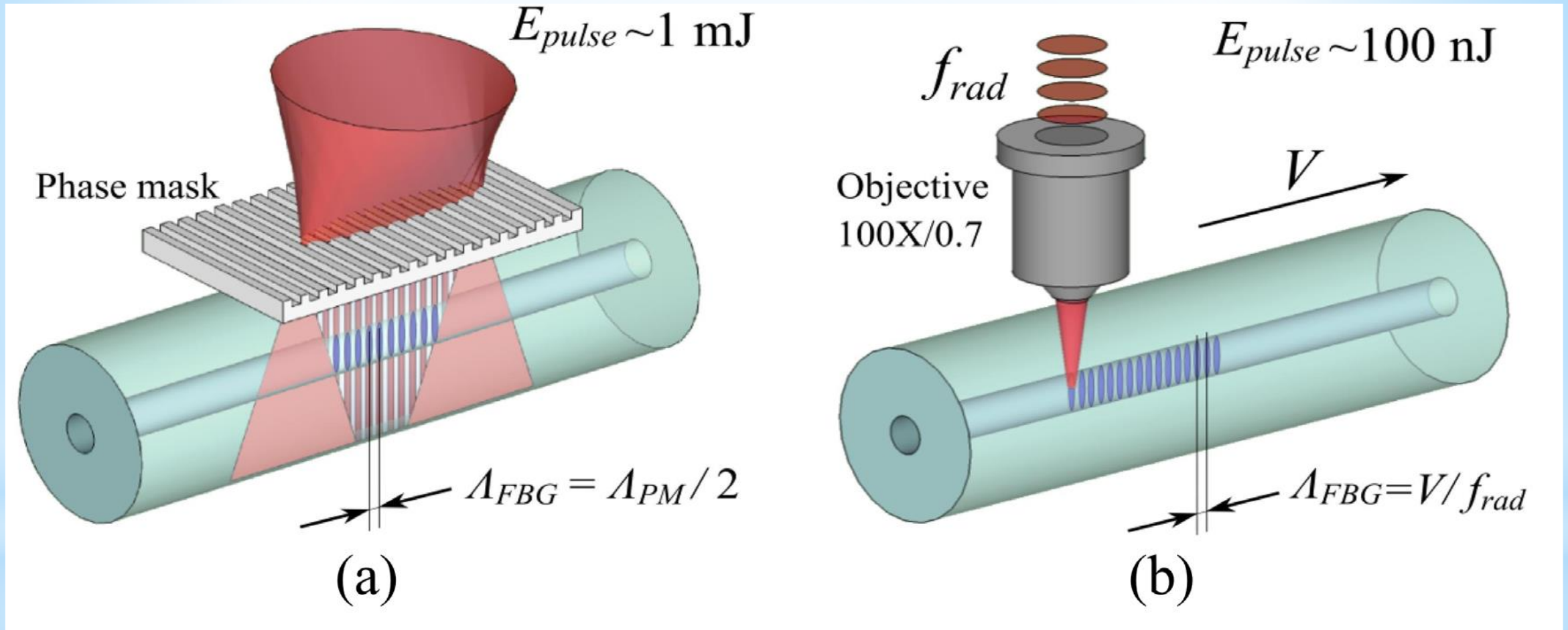


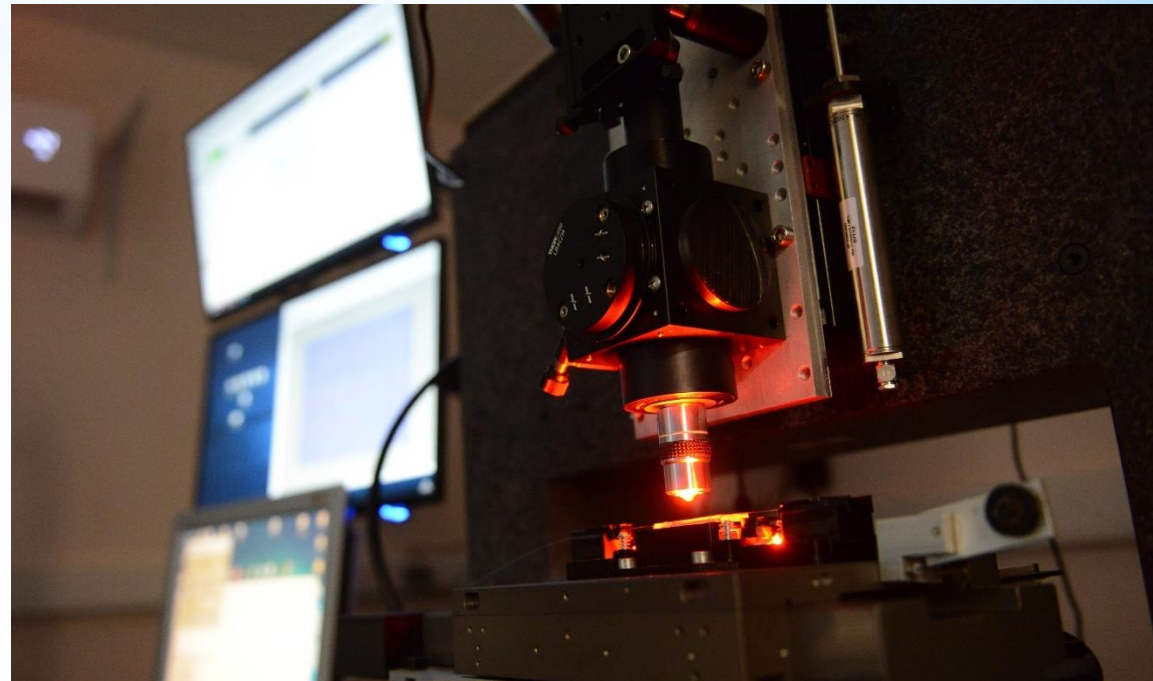
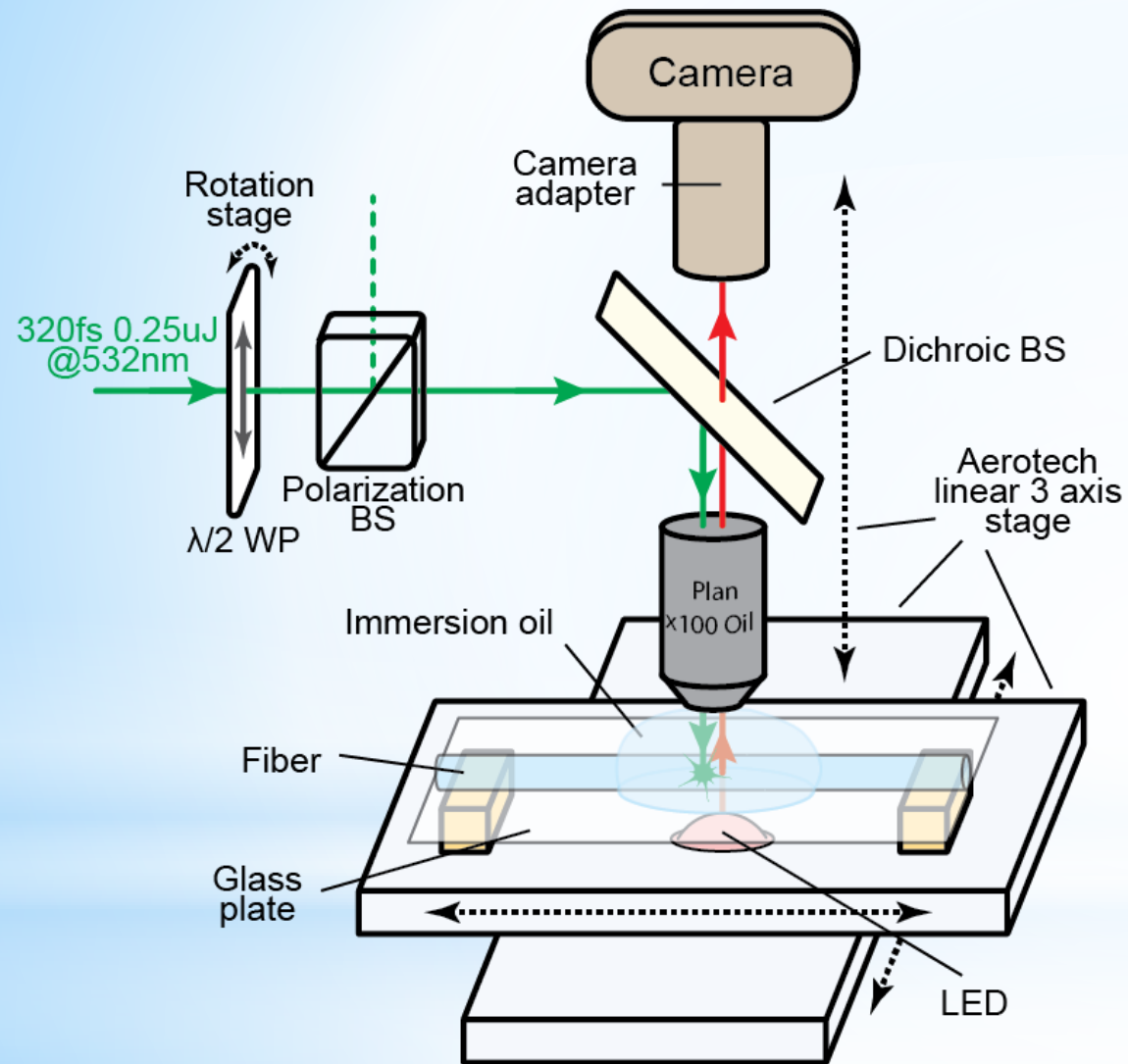
Схема записи брэгговской решетки с помощью фазовой маски и УФ-излучения



Запись брэгговских решеток поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера

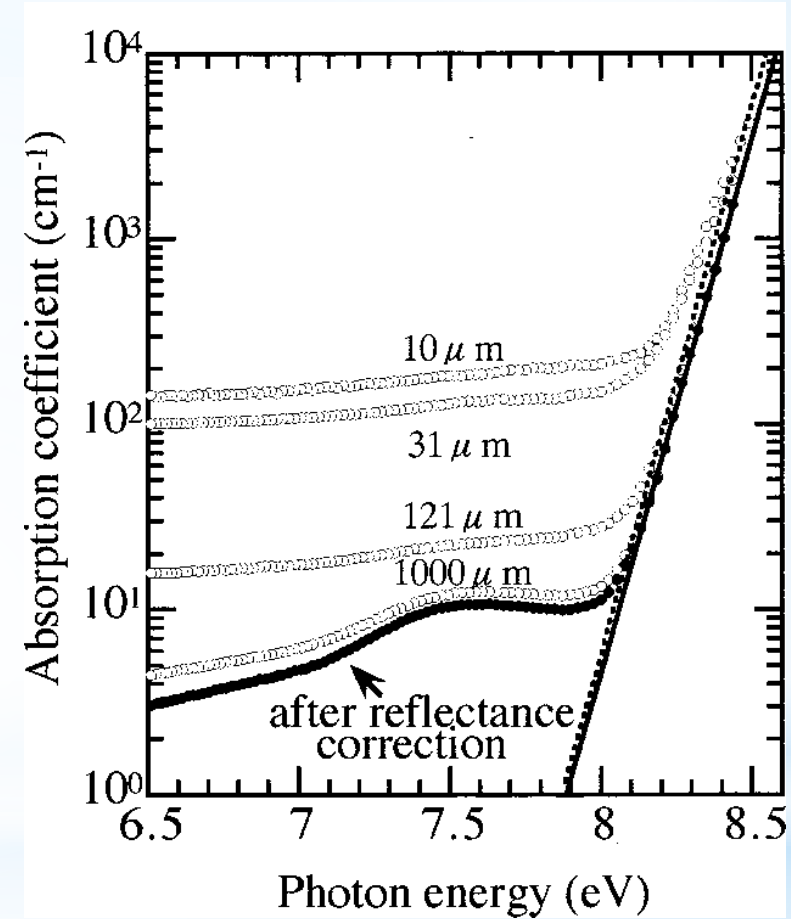
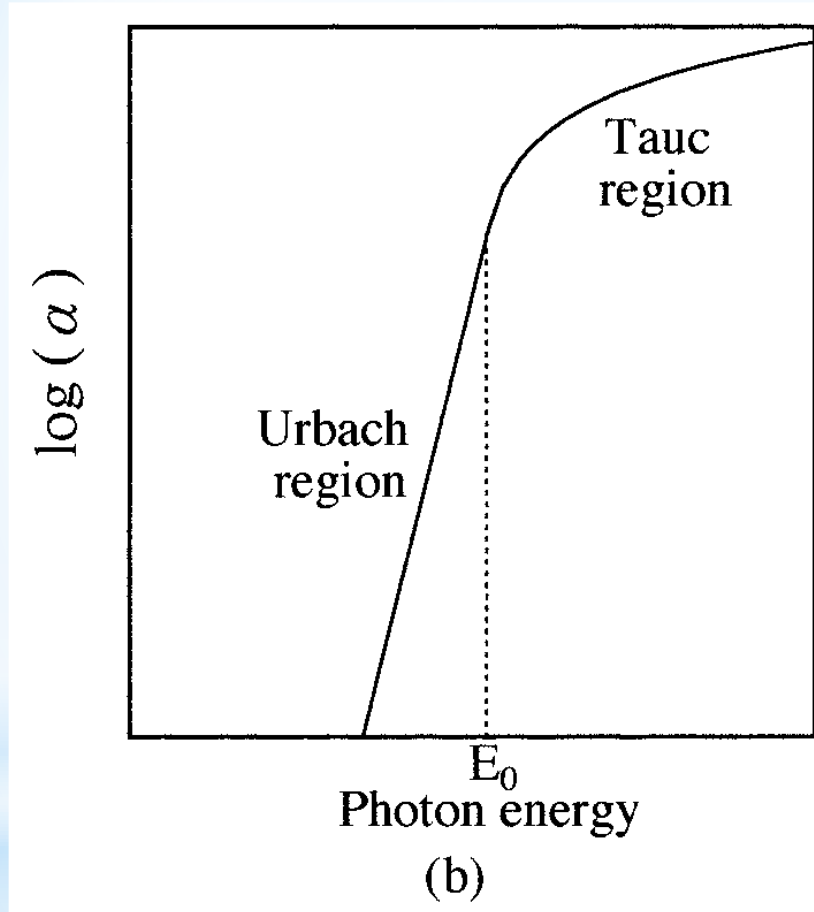


Экспериментальный комплекс на основе фемтосекундного лазера



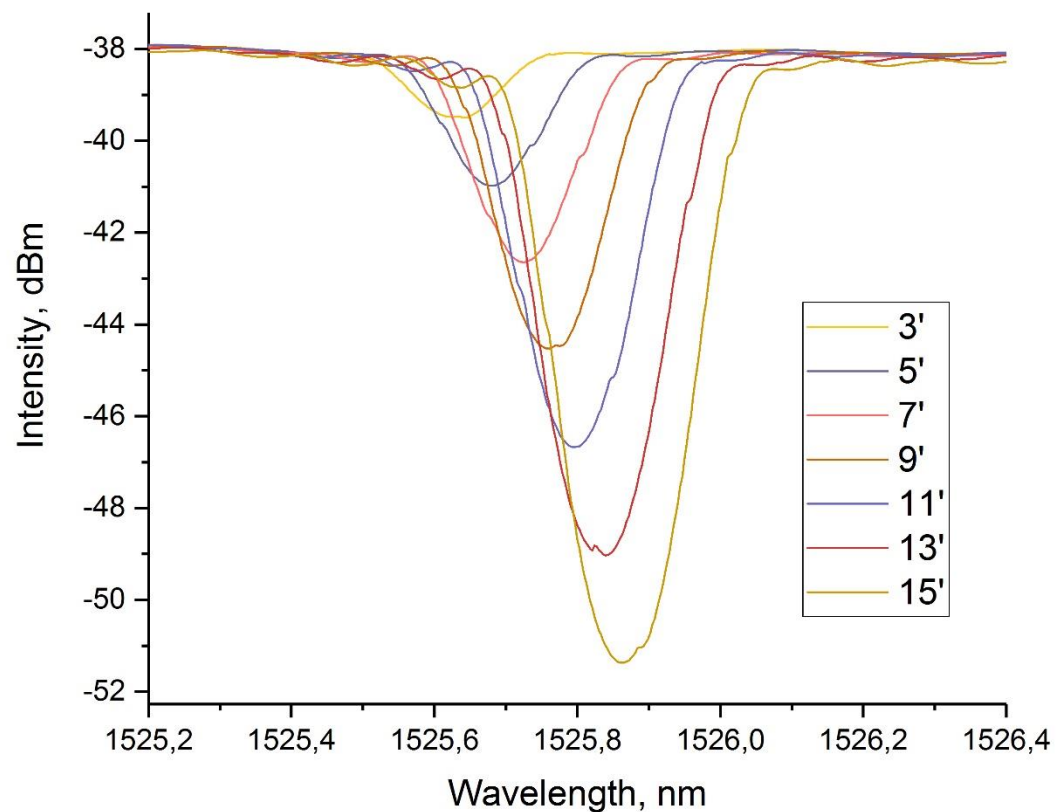
Ulyanov, D.V. Przhialkovskii, O.V. Butov, Results in Physics 30 (2022), 105101;
Dmitrii V. Przhialkovskii, Oleg V. Butov, Results in Physics, Vol. 30, 2021, 104902

Фундаментальное поглощение в кварцевом стекле

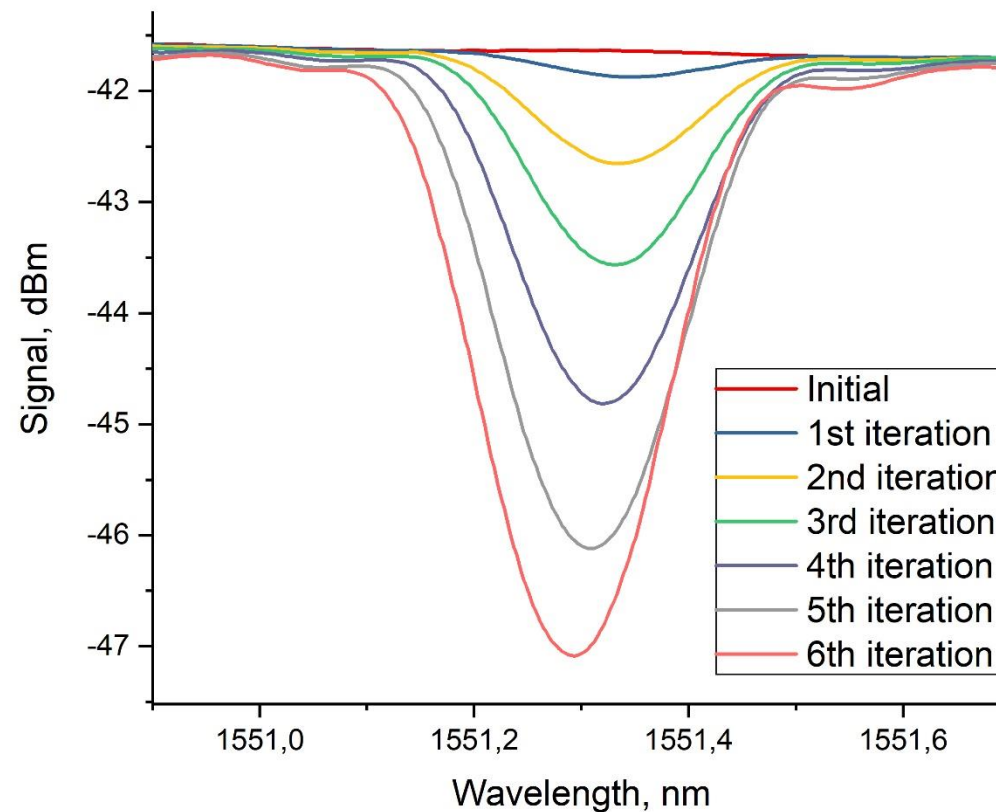


Динамика записи ВБР

УФ-запись (193 нм)

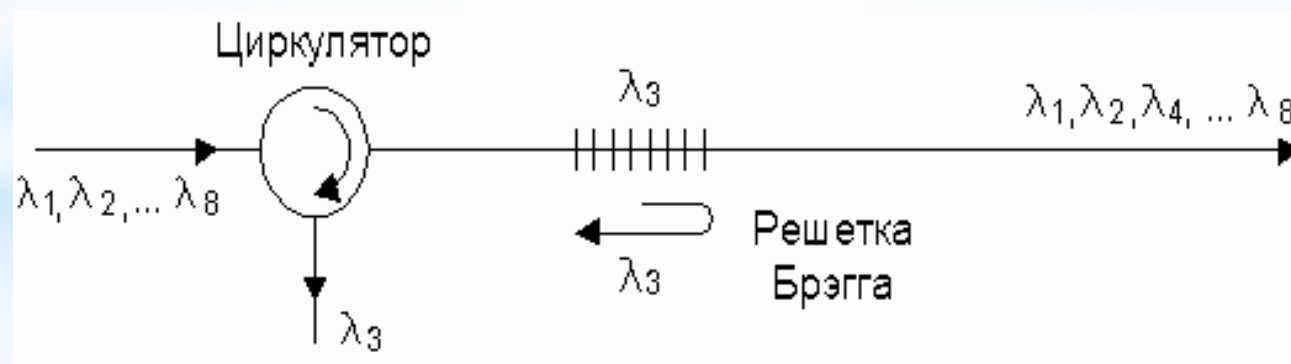
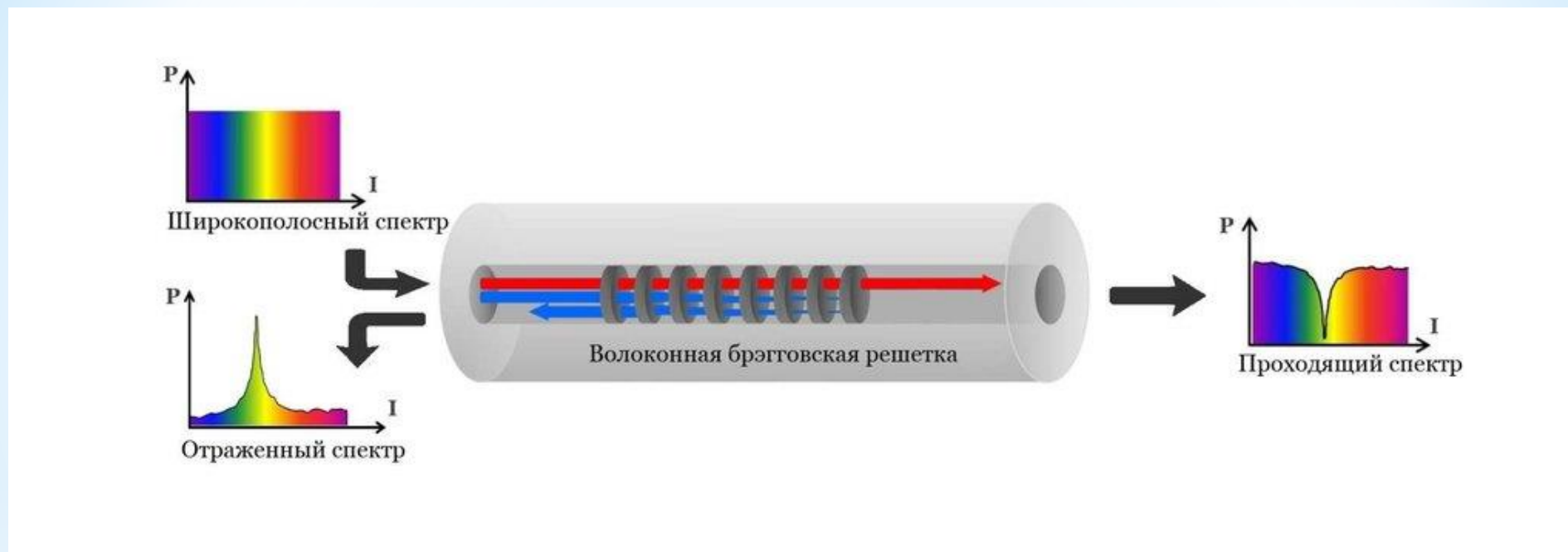


фс-запись



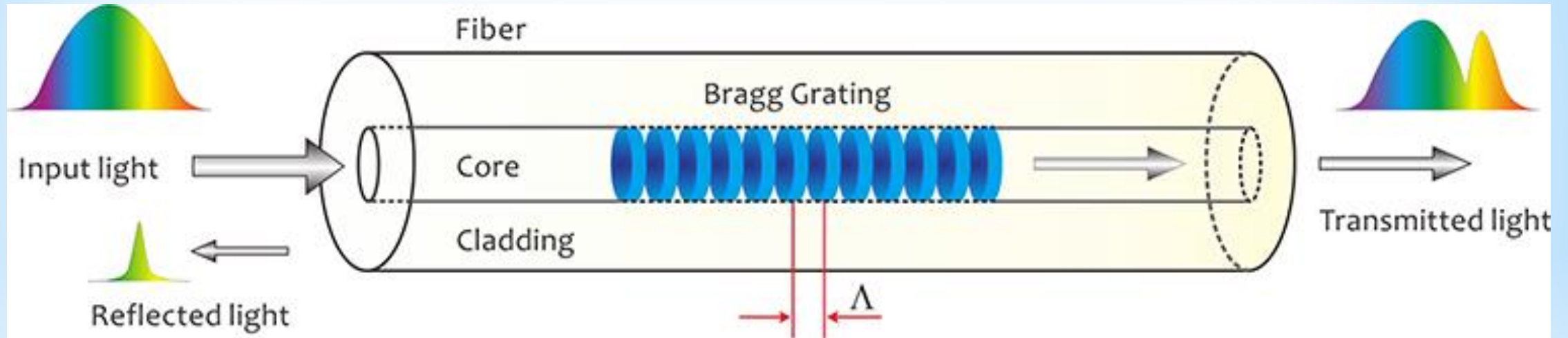
Фильтры, селекторы и сенсоры

Демультимплексор на брэгговской решетке



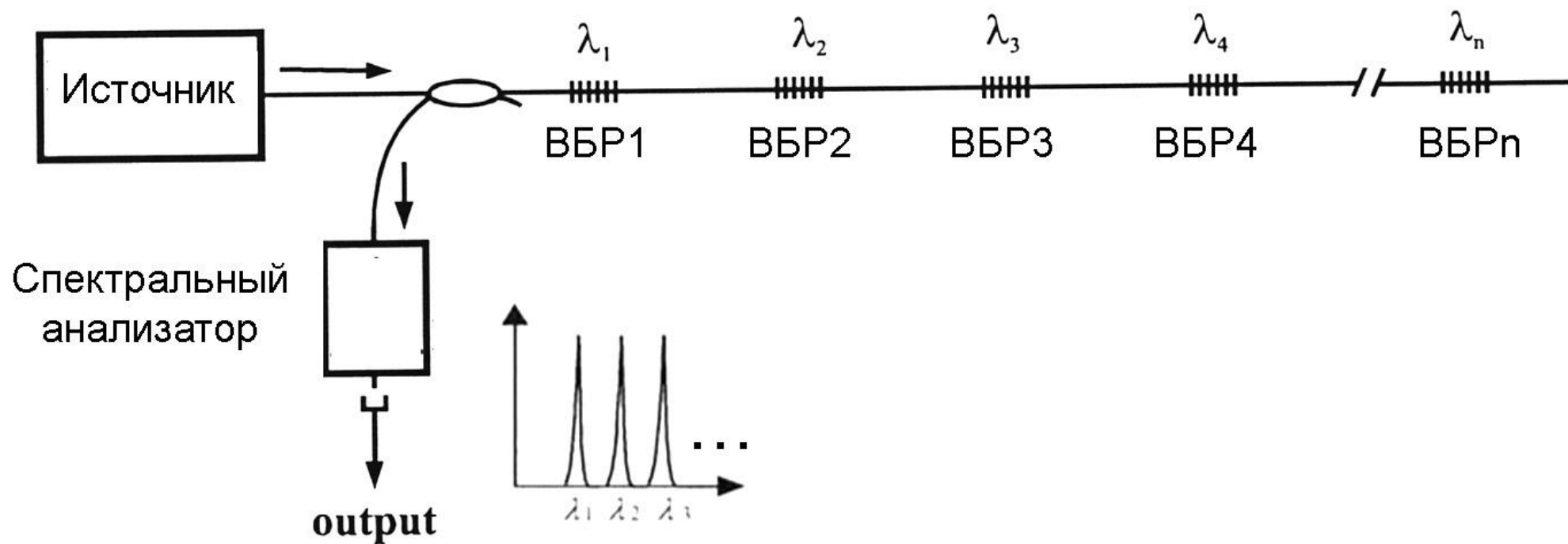
Волоконная брэгговская решетка

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

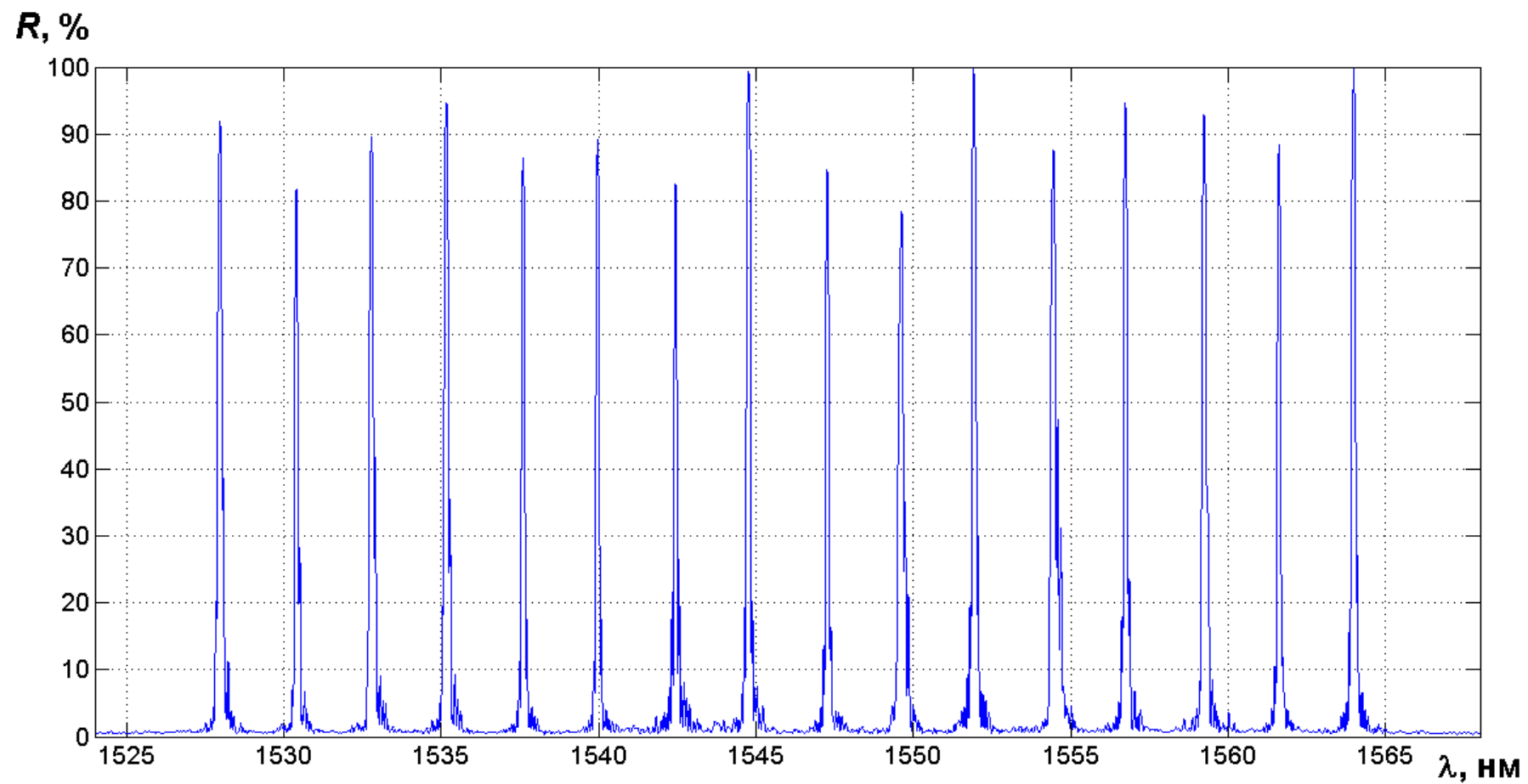


$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta l} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta l}\right)\Delta l$$

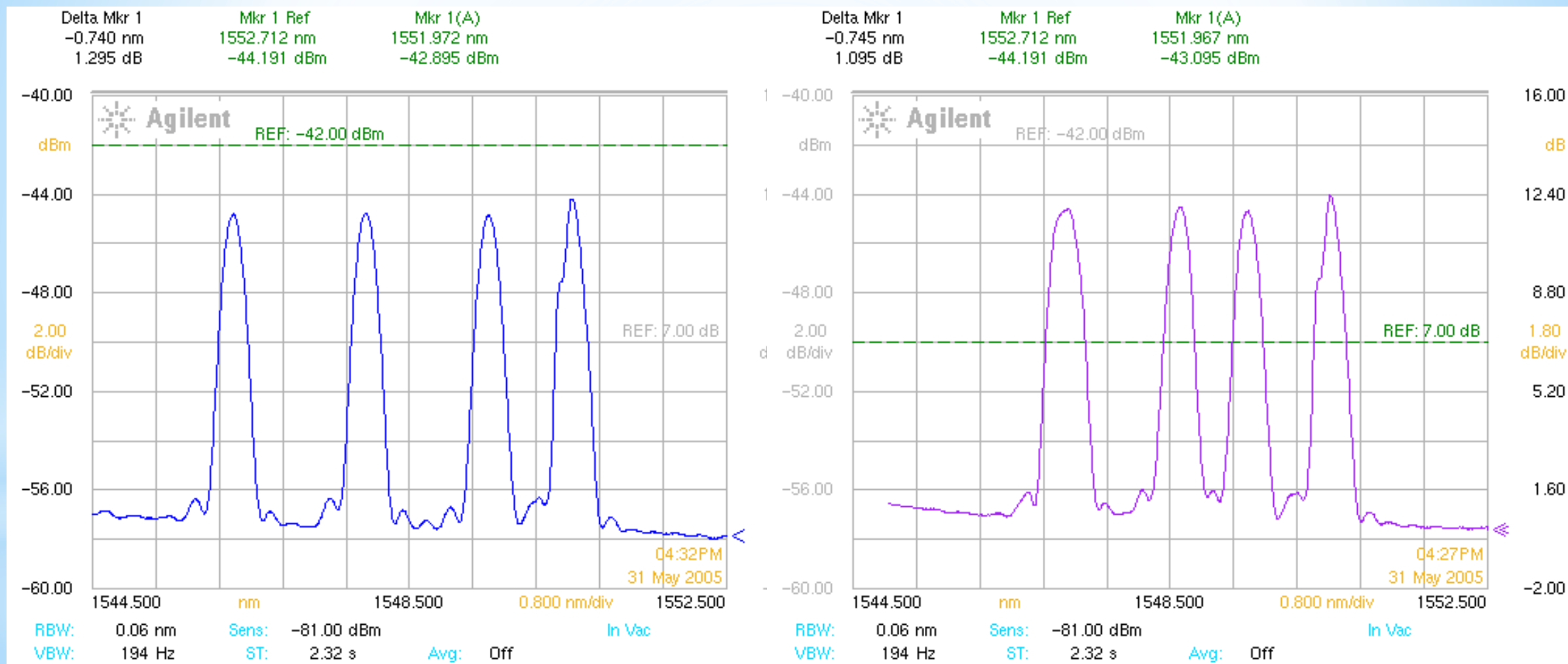
Квазираспределенная сенсорная система



Квазираспределенная сенсорная система

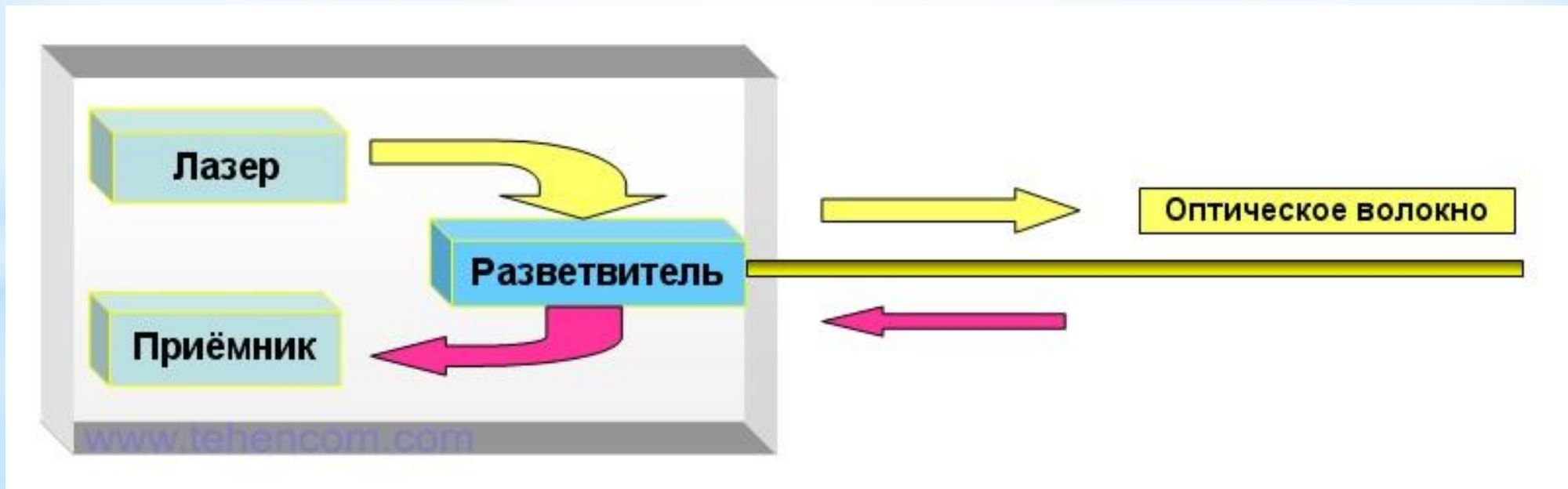
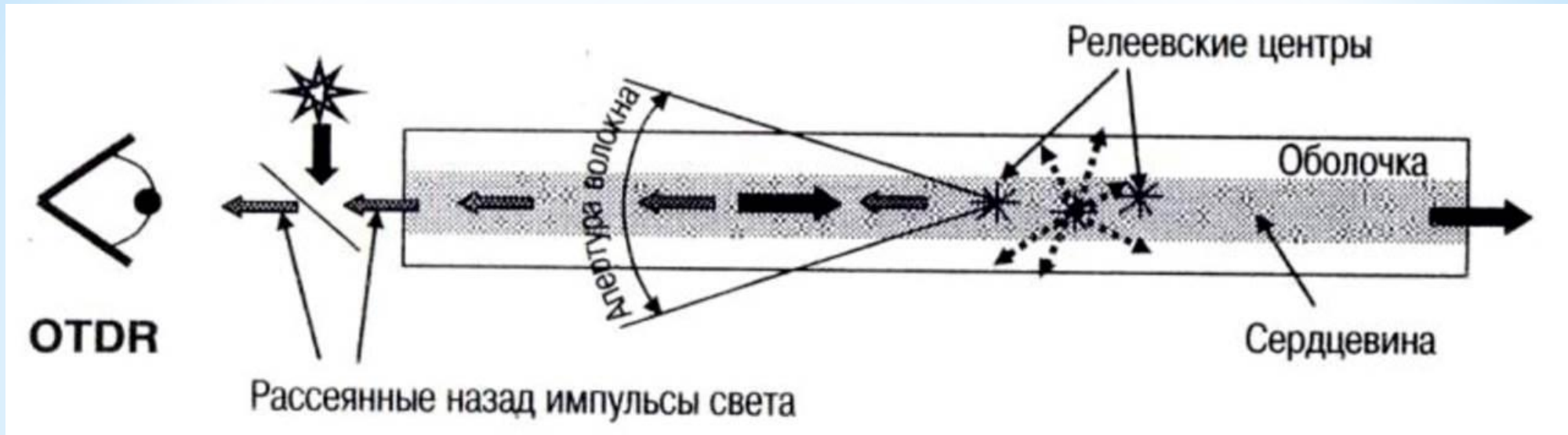


Квазираспределенная сенсорная система

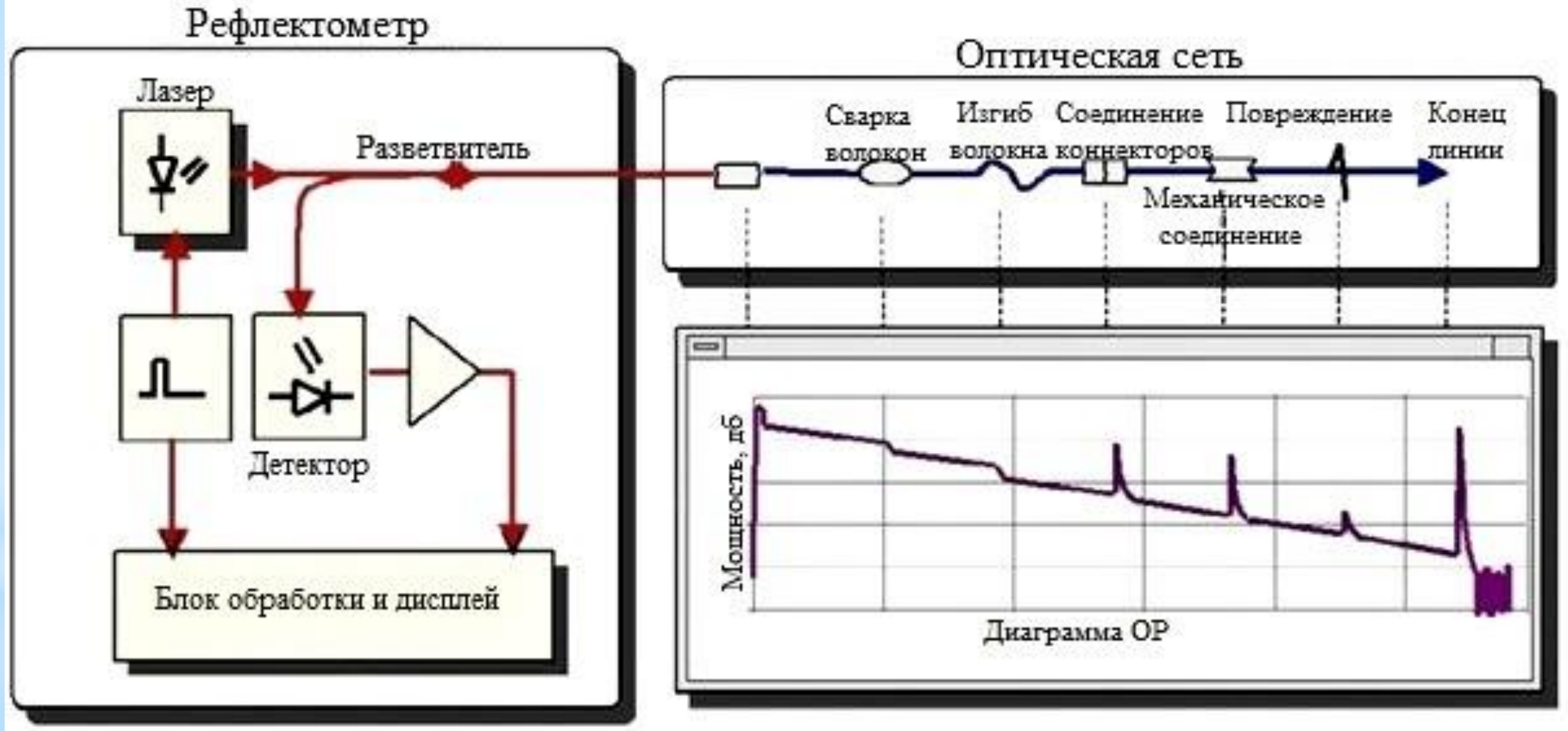


Решетки в когерентной рефлектометрии

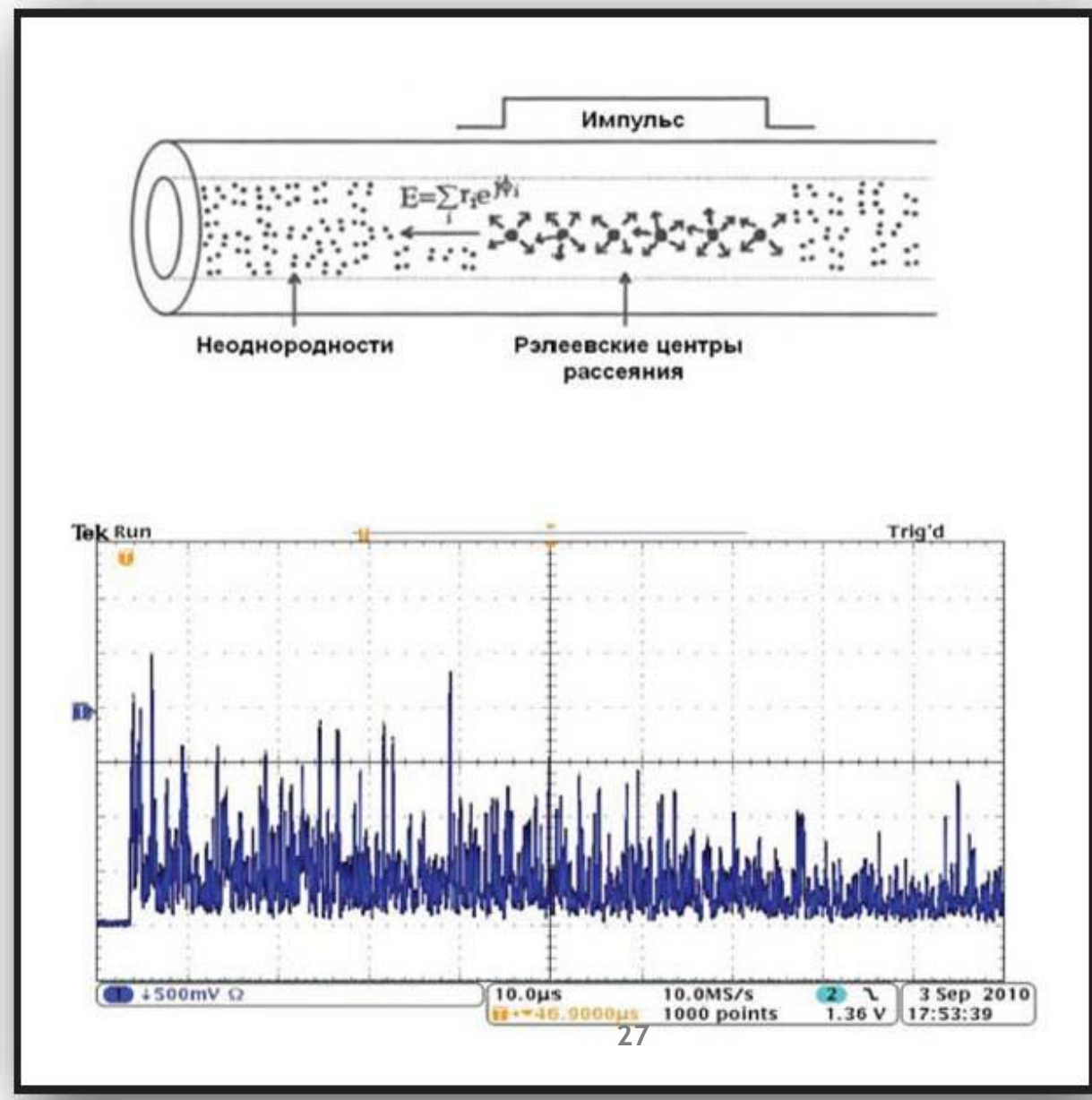
Рефлектометрия



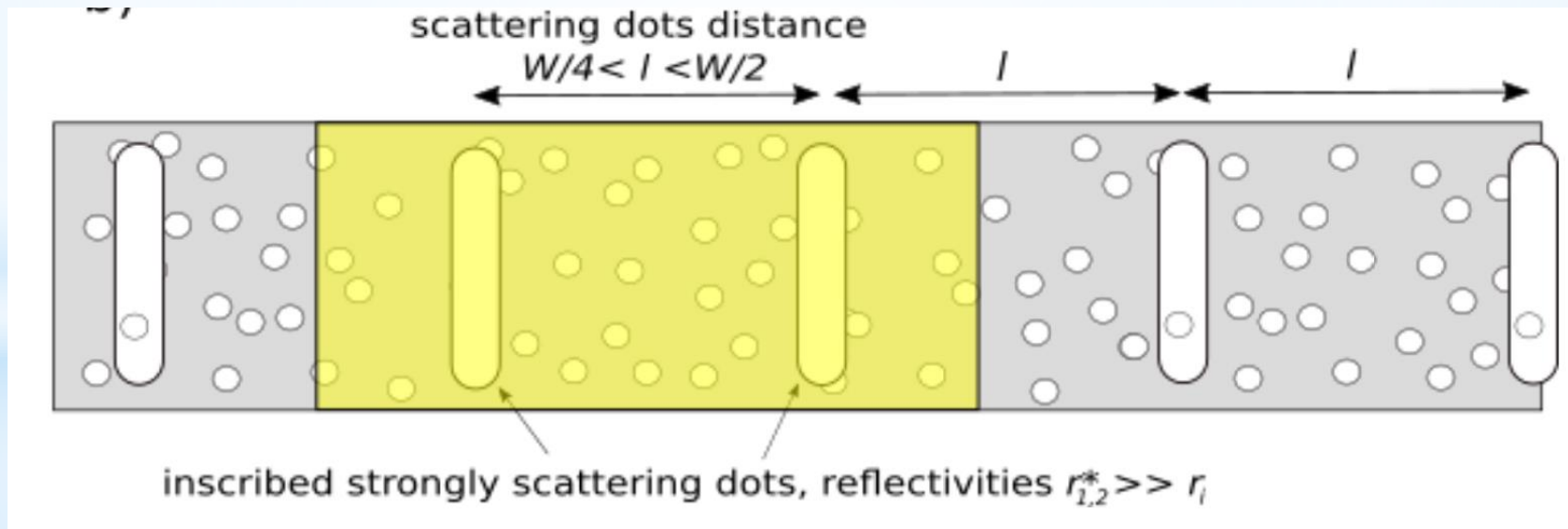
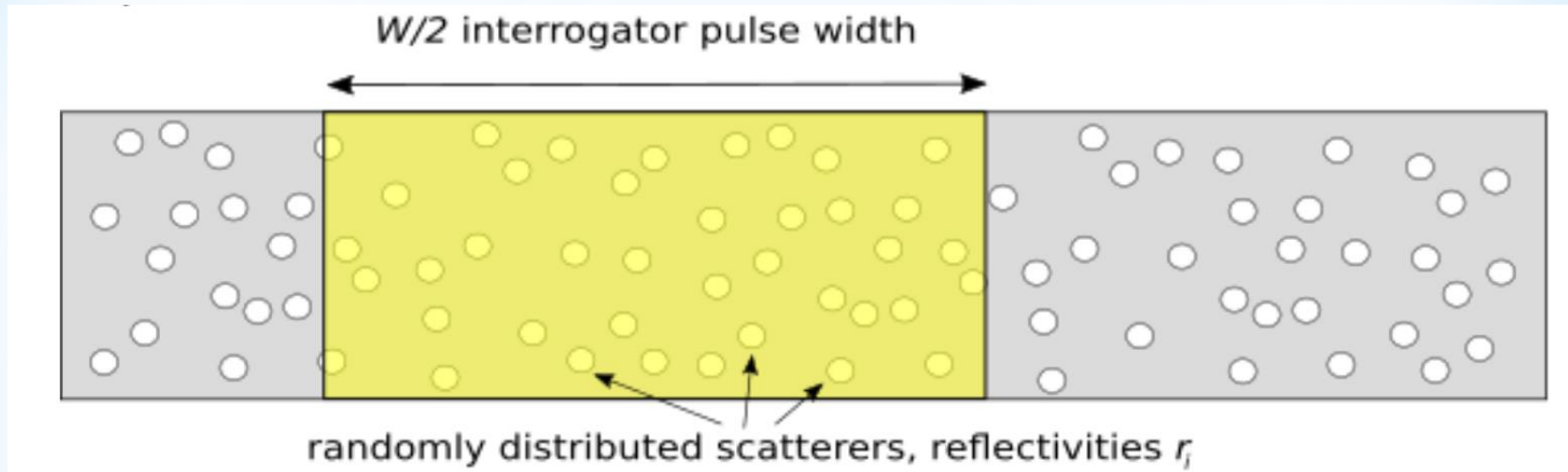
Рефлектометрия



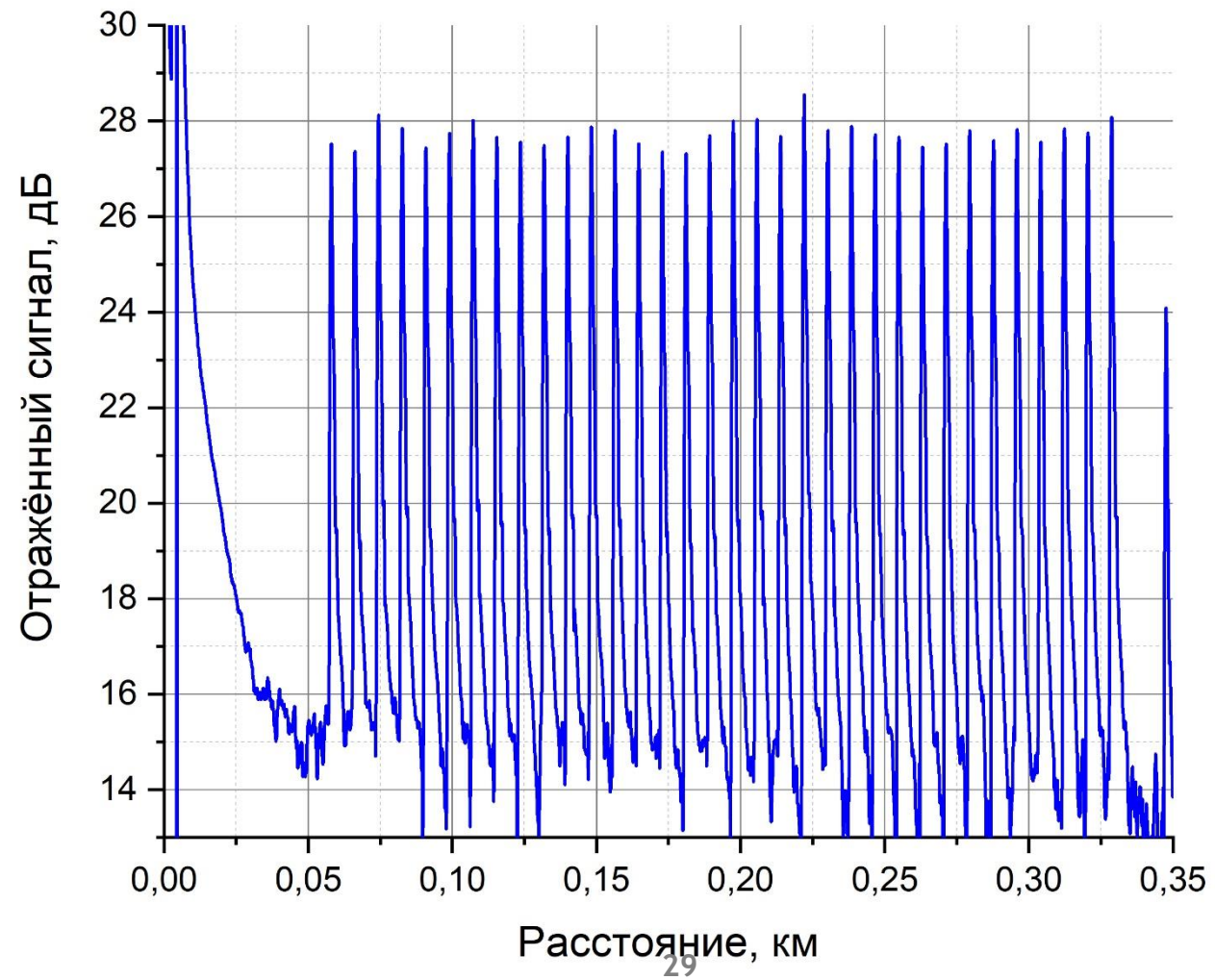
Когерентная рефлектометрия



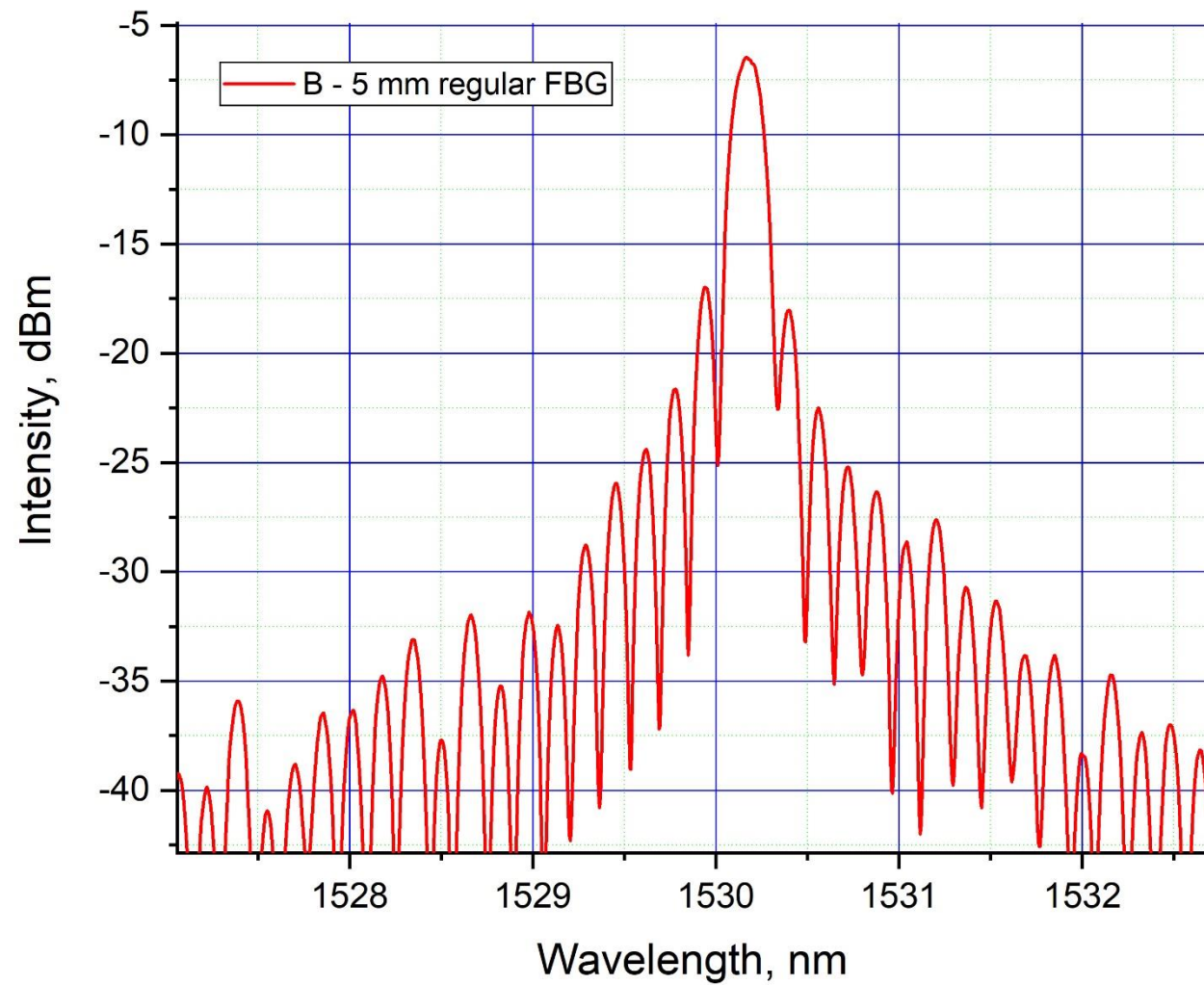
Когерентная рефлектометрия



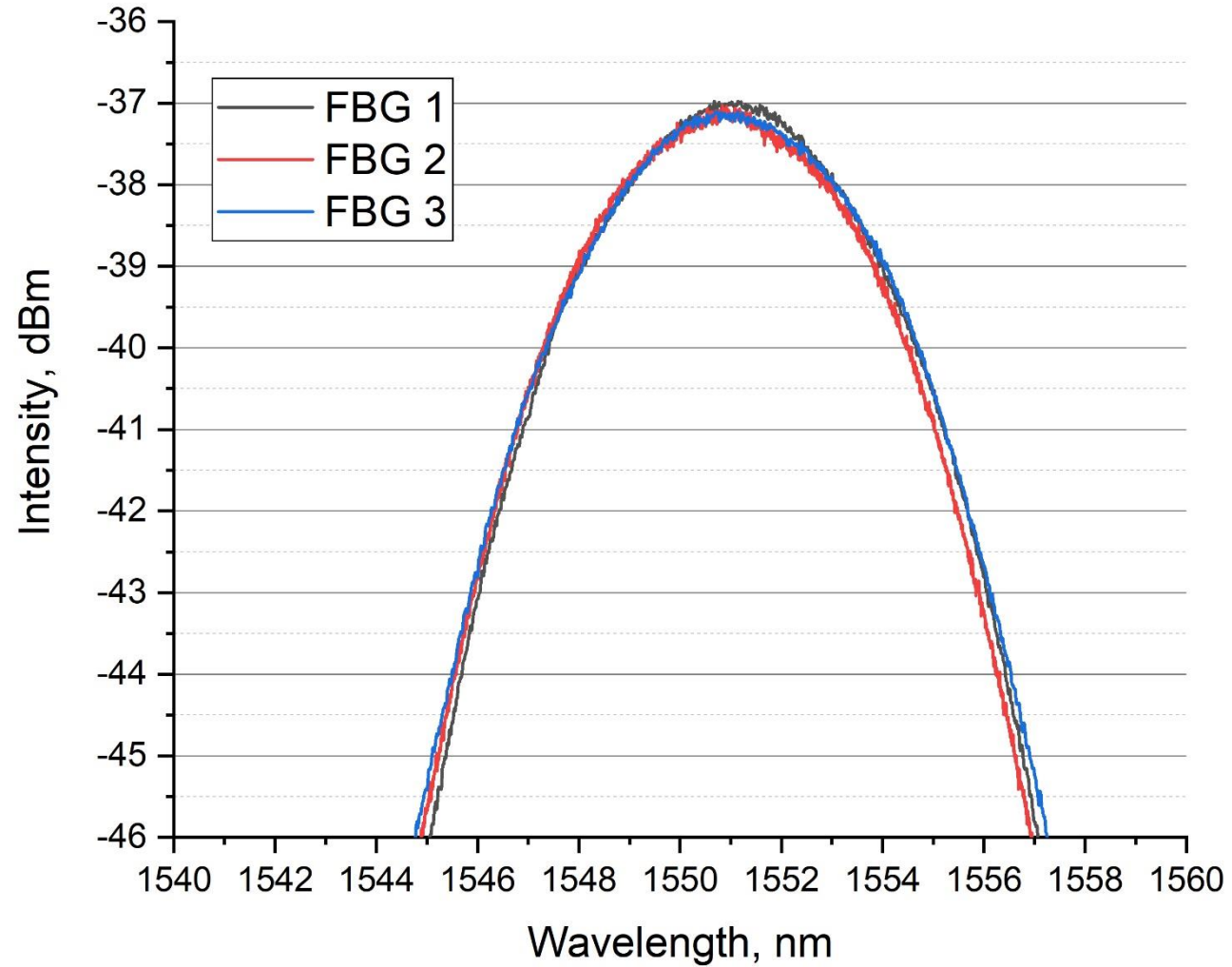
Рефлектограмма линии с брэгговскими решетками,



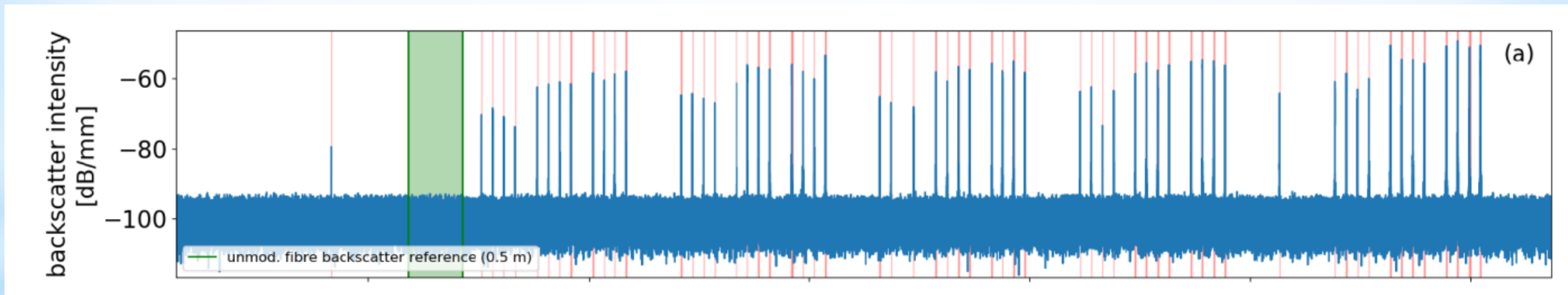
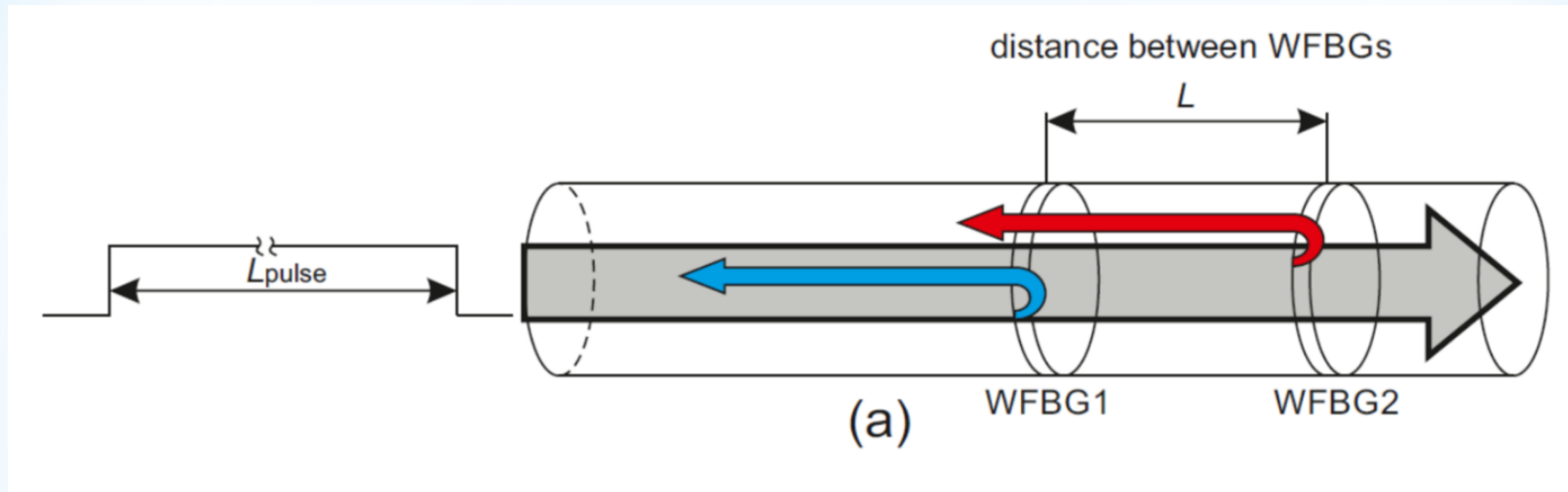
Типичный спектр отражения брэгговской решетки



Брэгговские решетки с широким спектром



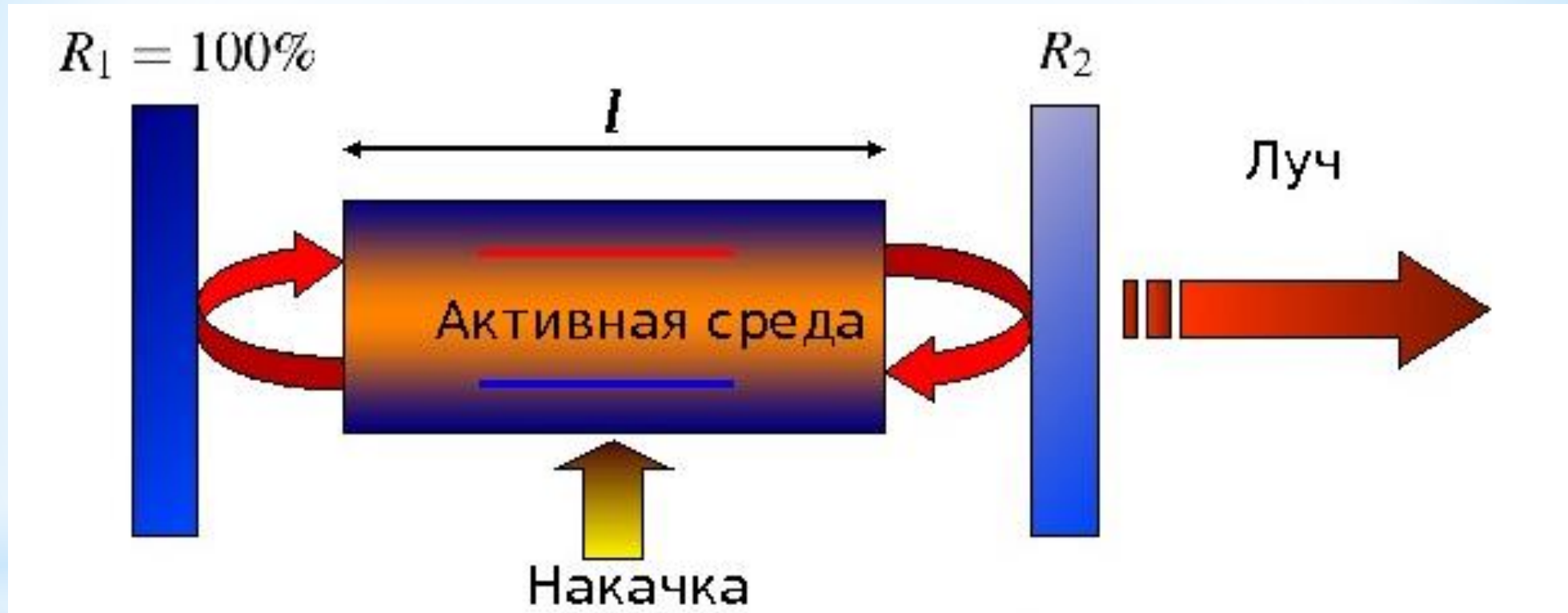
Когерентная рефлектометрия



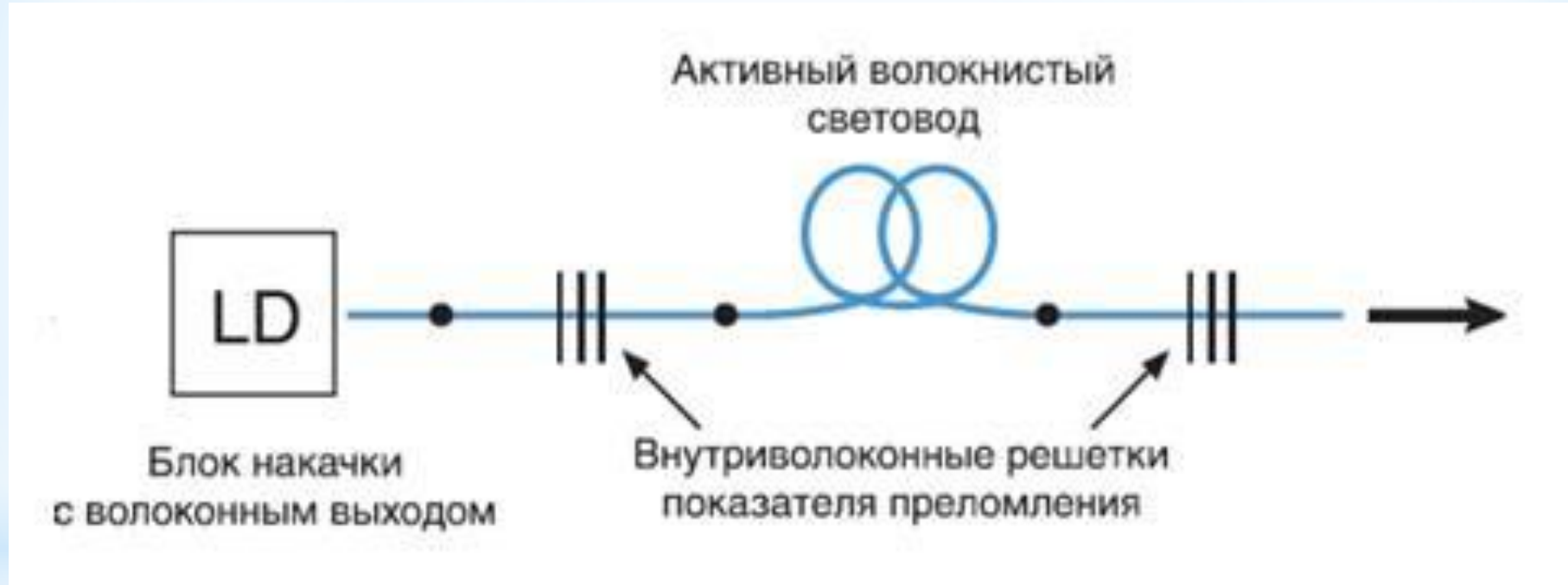
Волоконный лазер

Fiber laser

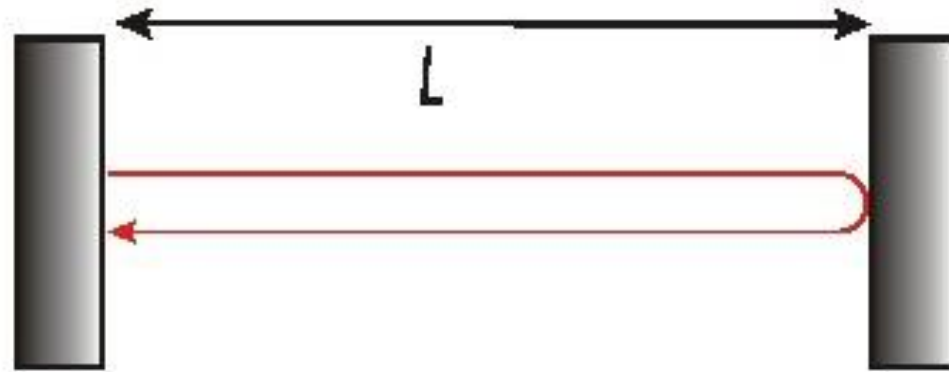
Принцип работы лазера



Принцип работы волоконного лазера



Продольные моды резонатора

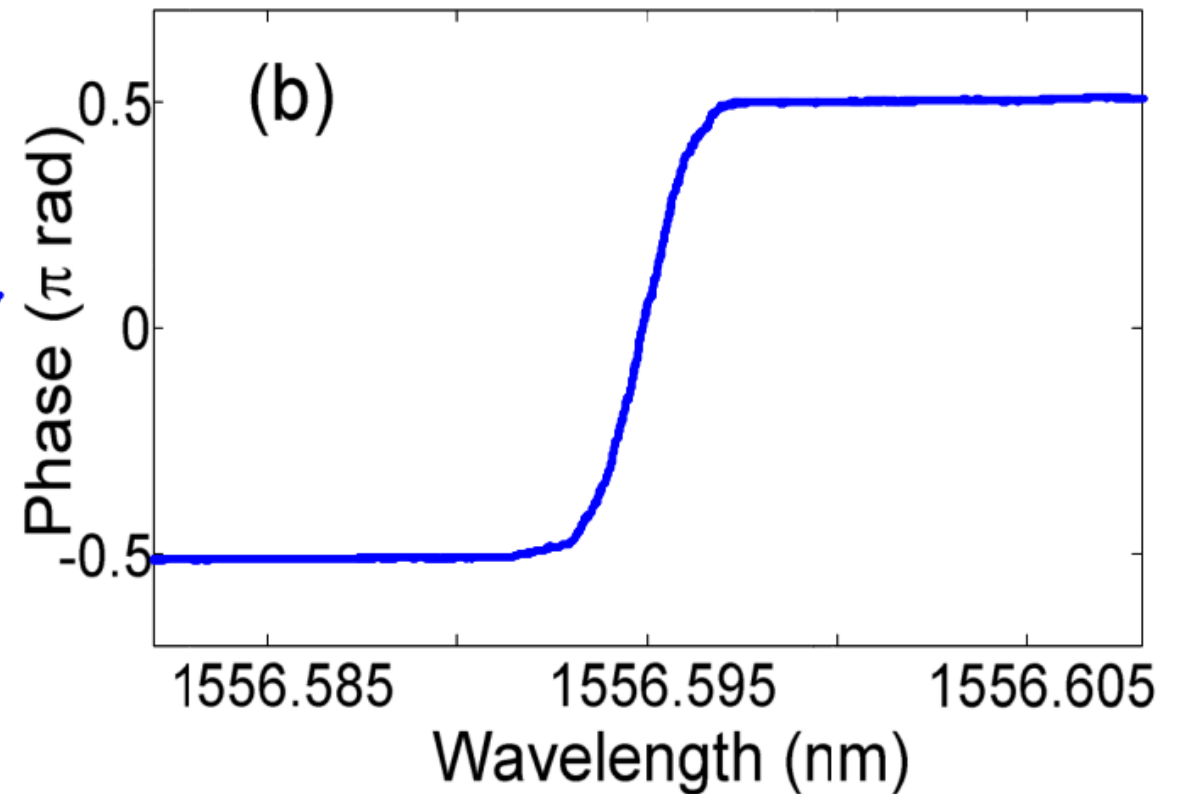
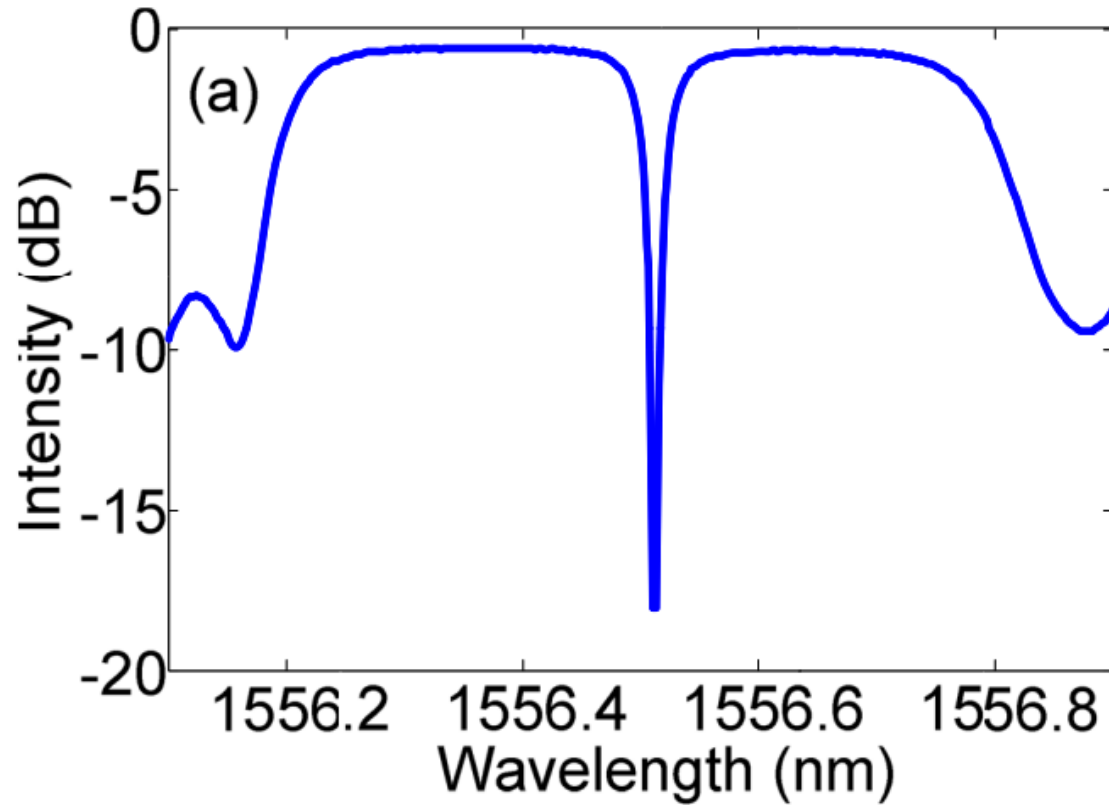


$$2L = n\lambda;$$

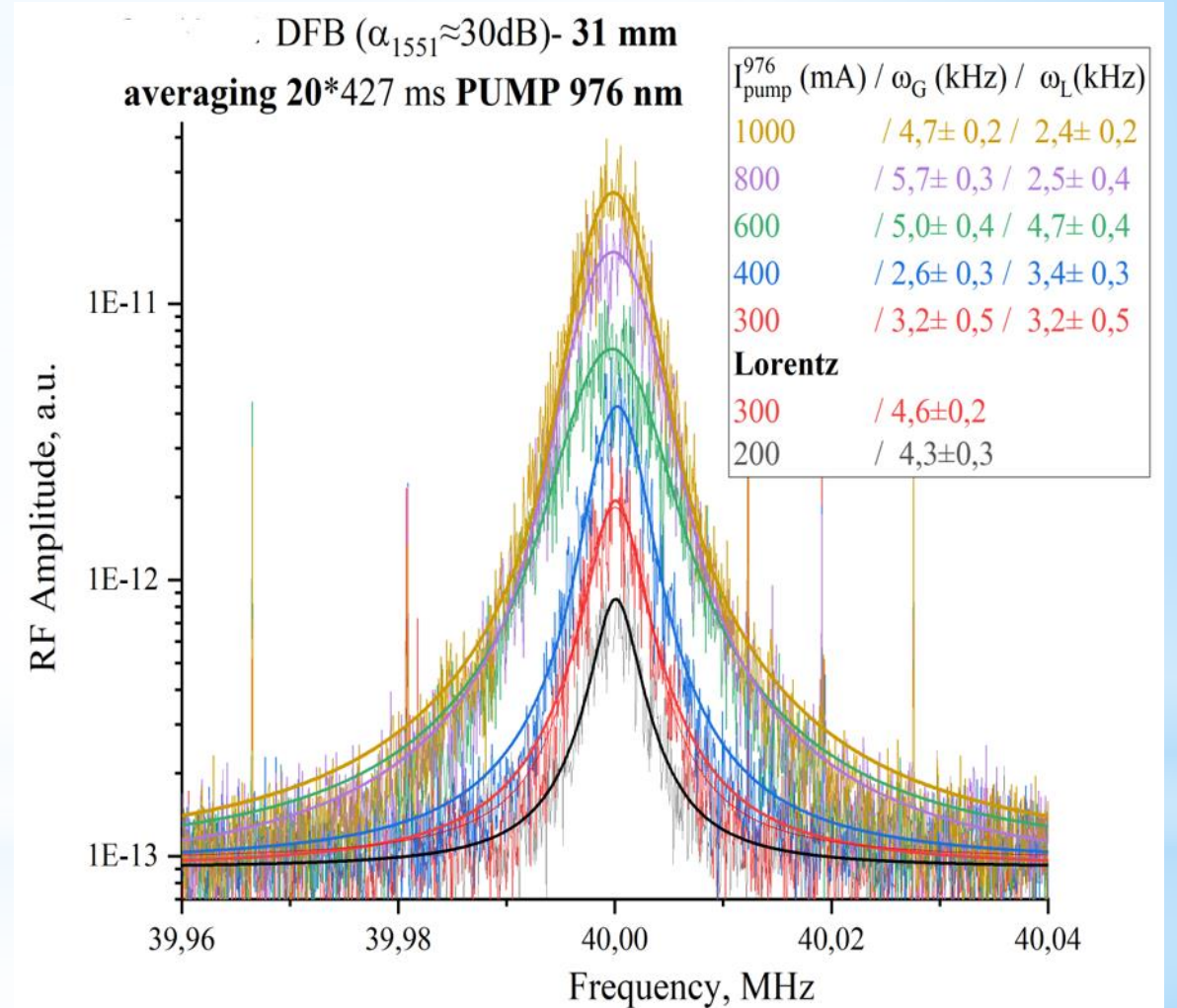
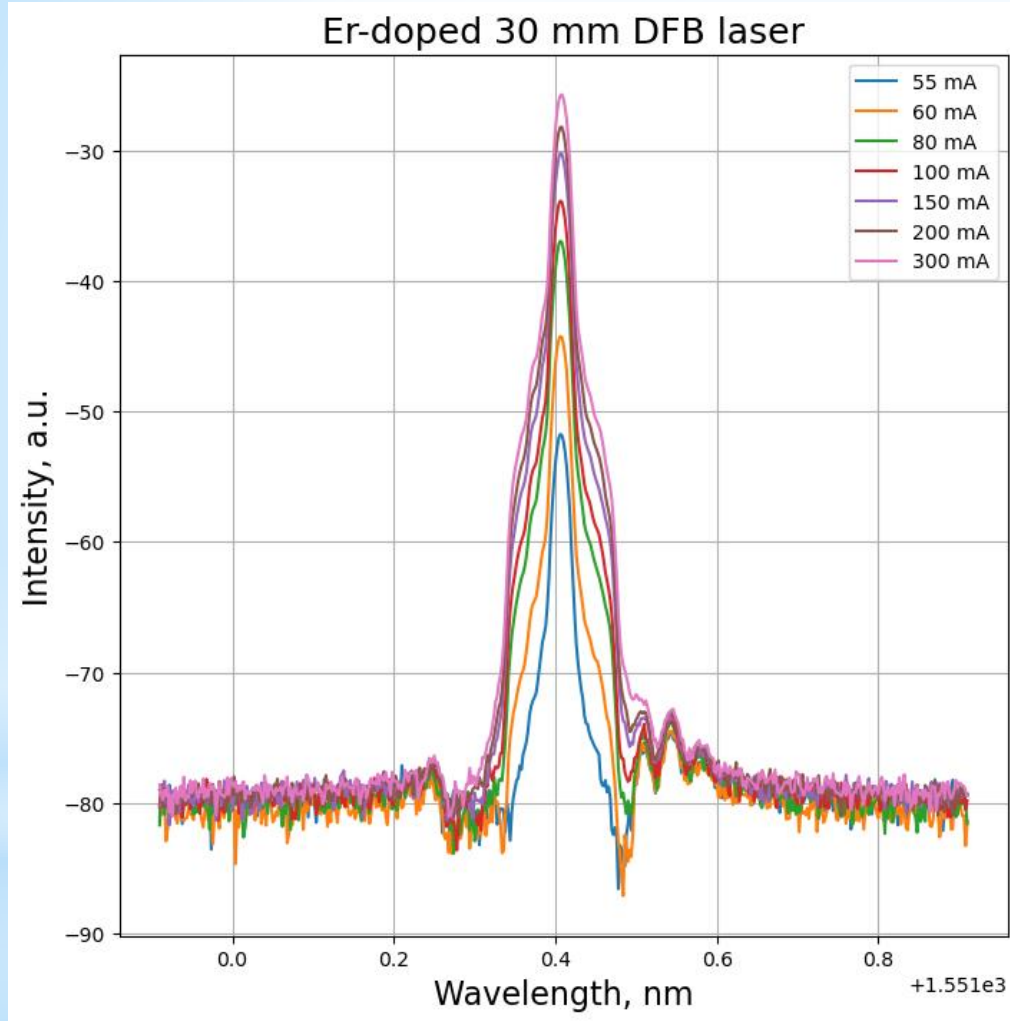
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L}$$

Для $\lambda = 600$ нм и $L = 0.6$ м $\Delta\lambda = 3 \times 10^{-4}$ нм

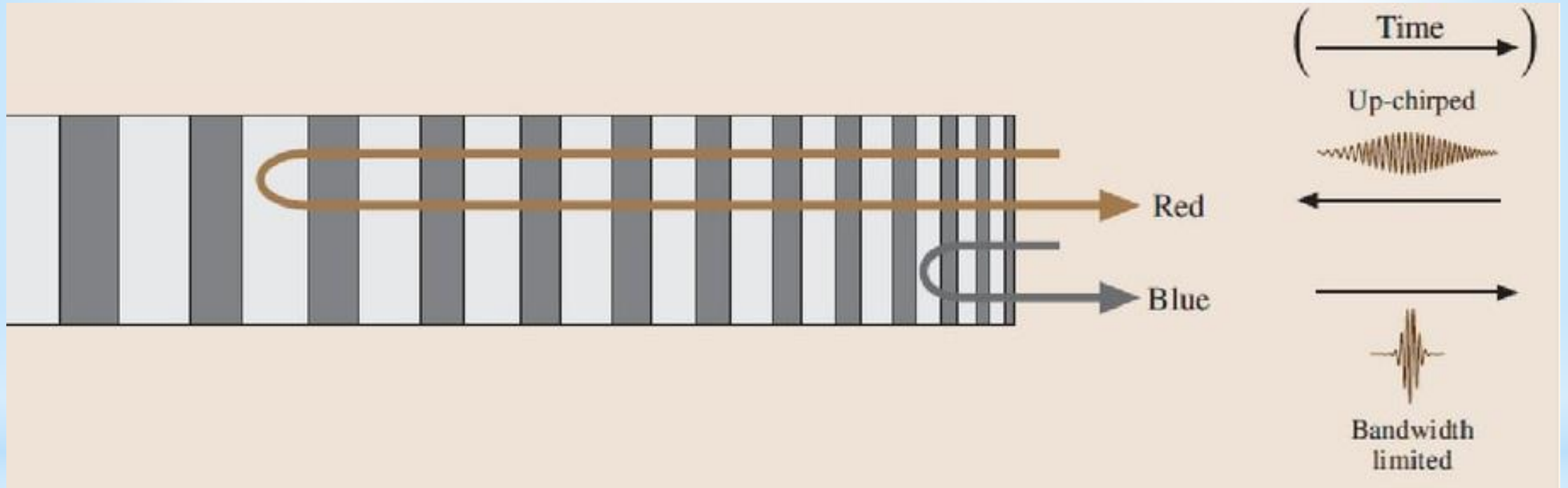
Решетка с фазовым (π) сдвигом в структуре



Лазер с распределенной обратной связью



Чирпированная брэгговская решетка



Компенсатор дисперсии

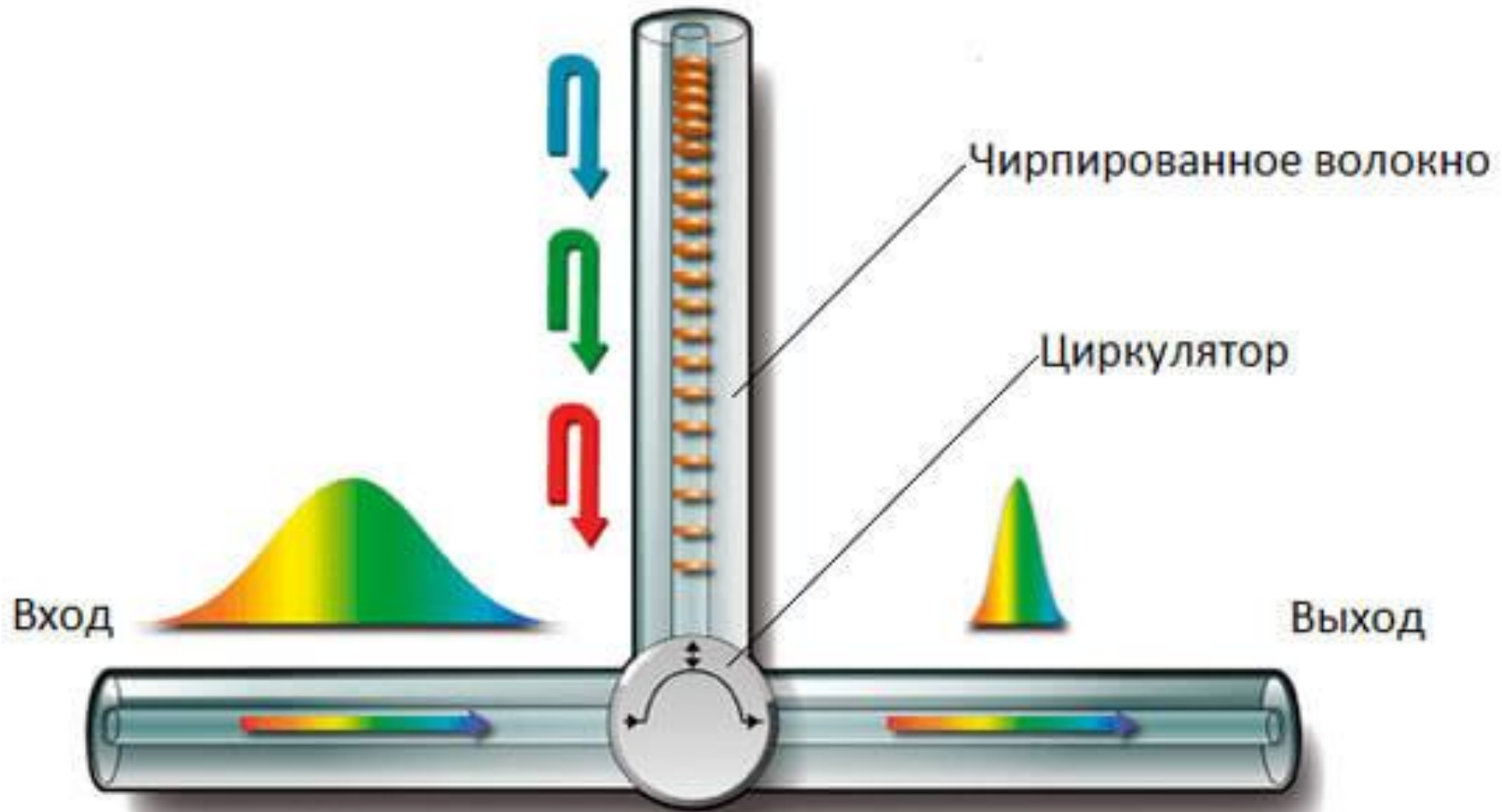
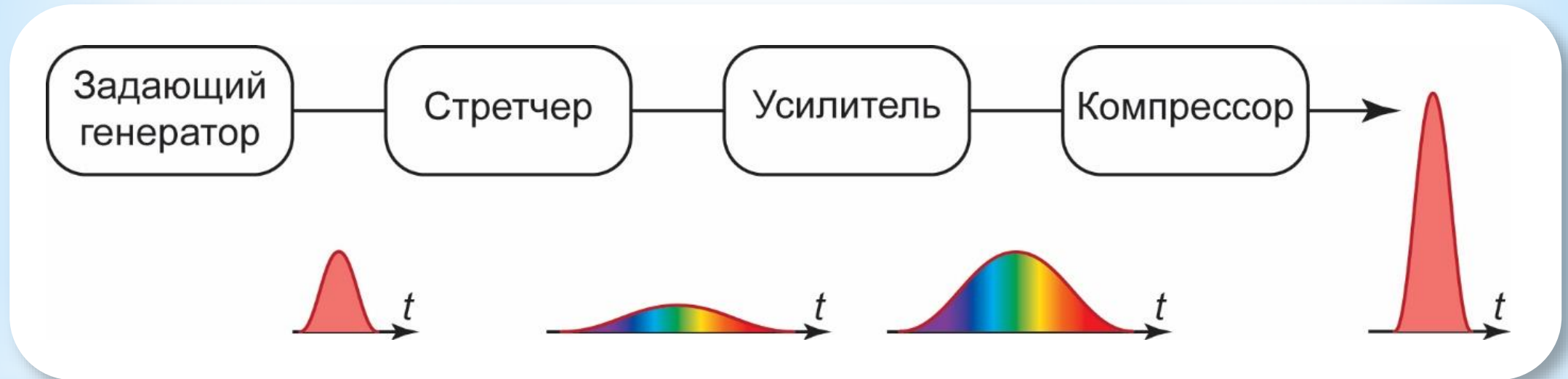


Схема усиления чирпированных импульсов (Chirped Pulses Amplification – CPA)



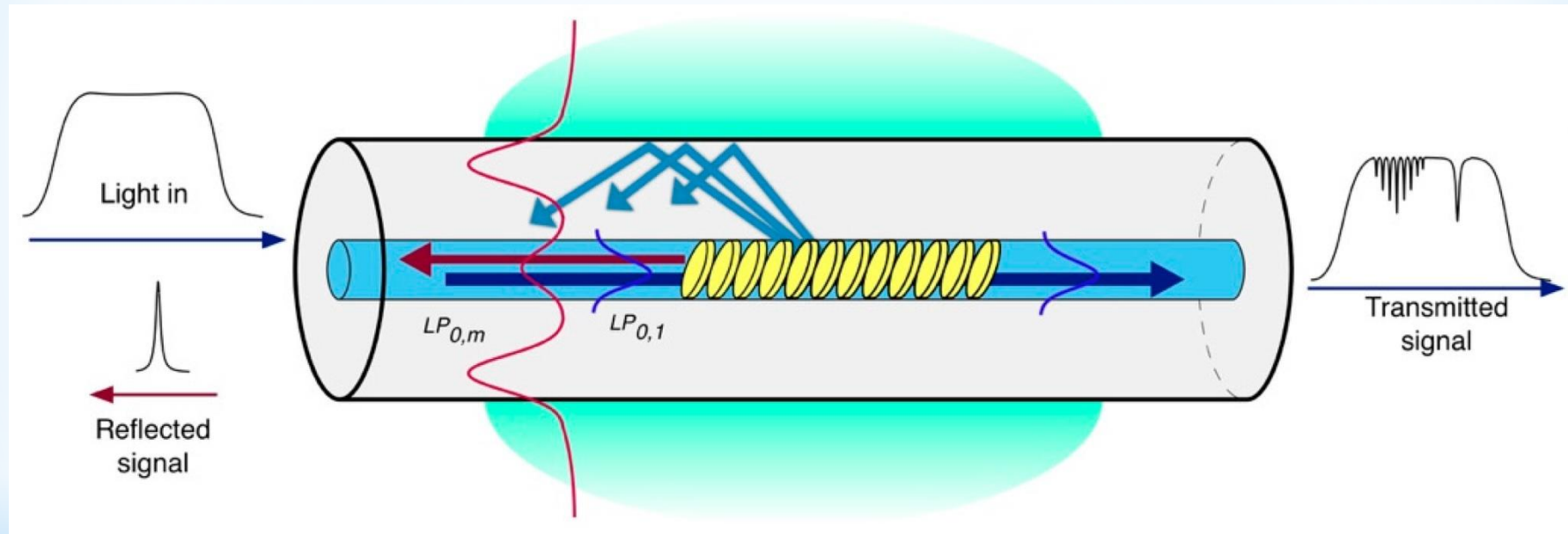
Для создания идеального стретчера необходимо обеспечить:

1. Возможность создания нелинейного чирпа
2. Аподизацию решетки

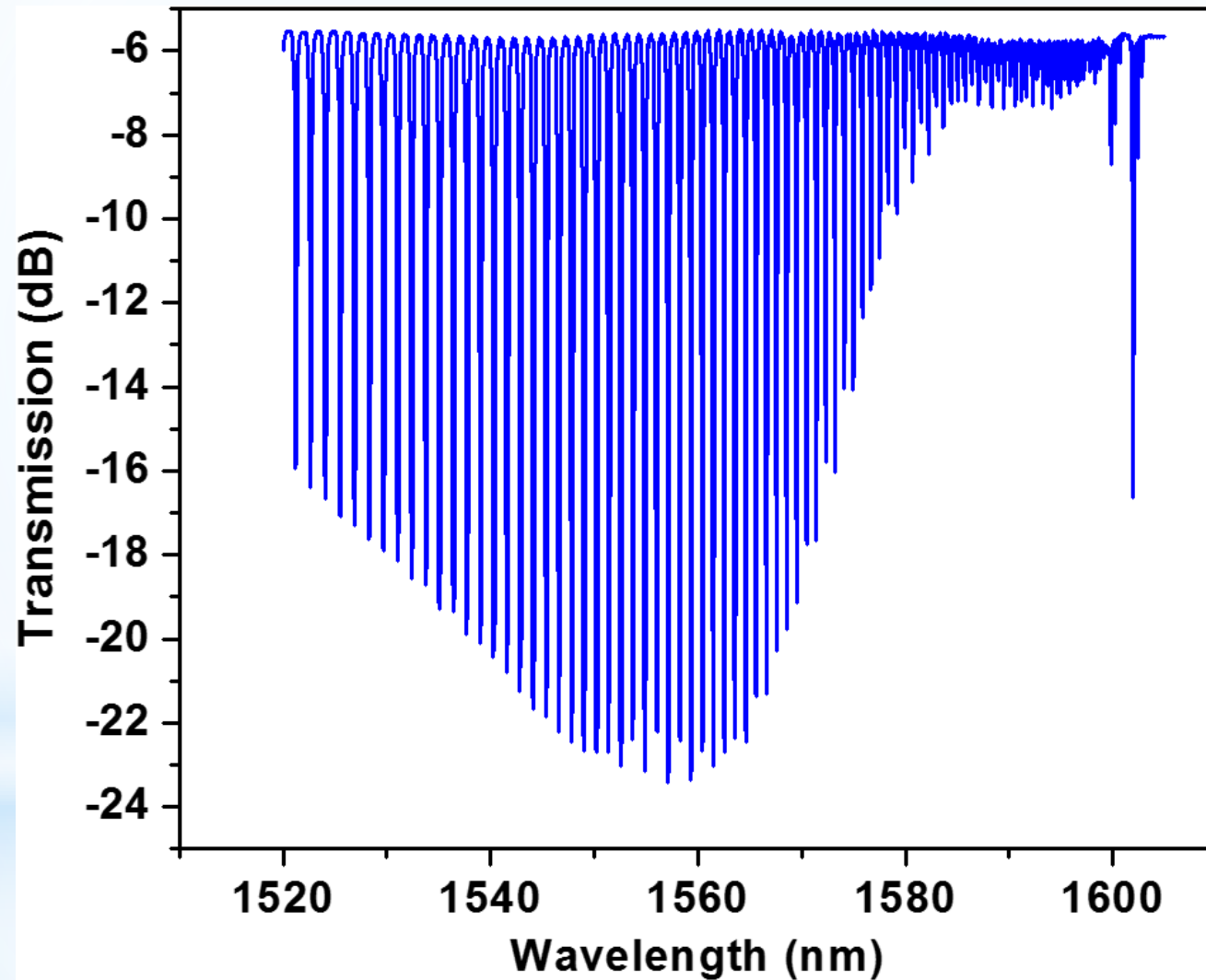
Наклонные волоконные брэгговские решетки (НВБР)

Tilted fiber Bragg gratings (TFBG)

Наклонная волоконная брэгговская решетка

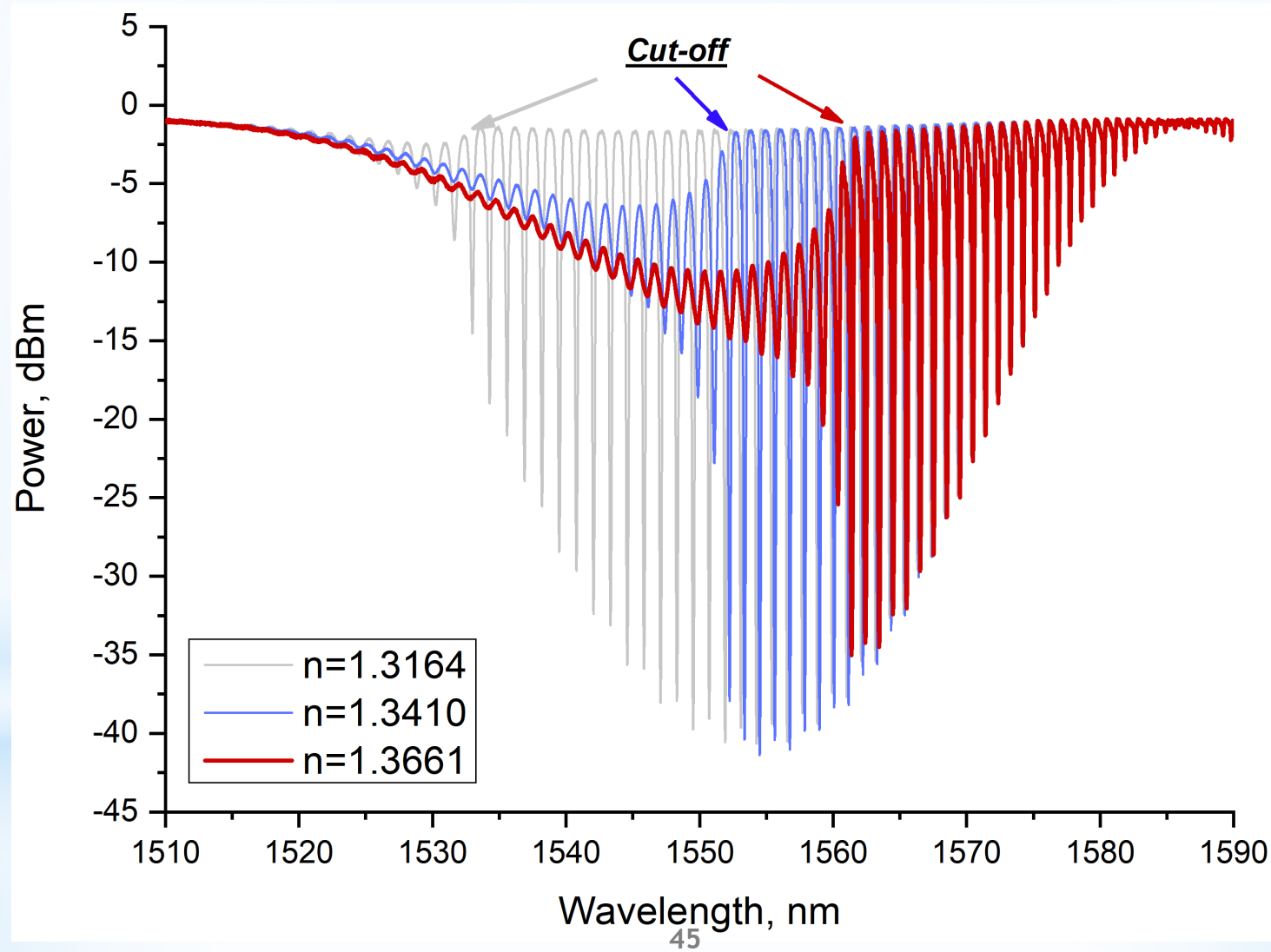


Типичный спектр пропускания НВБР

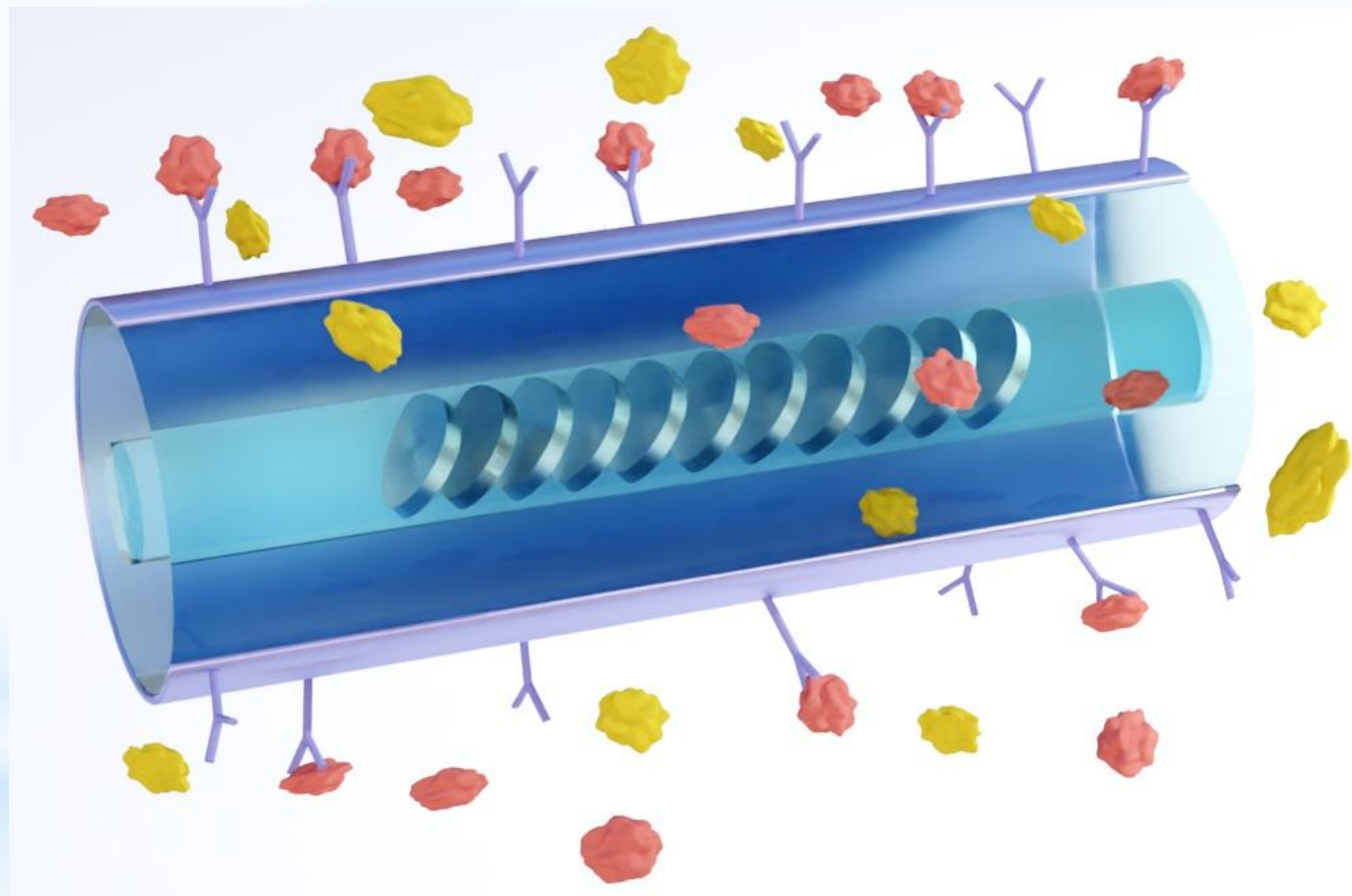


Спектр пропускания НВБР

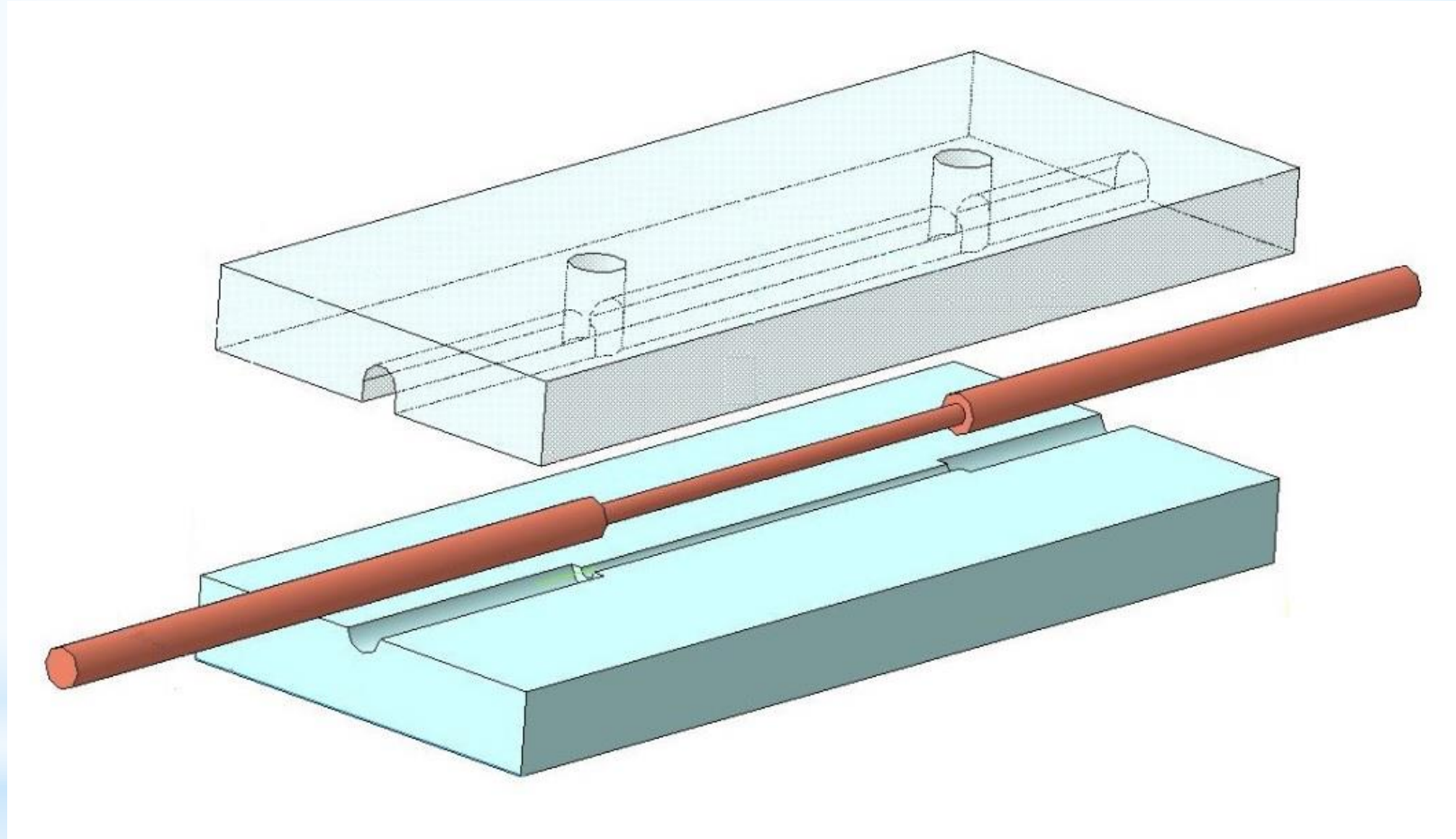
при различных показателях преломления окружающей среды



Волоконный биосенсор



Микрофлюидный чип с волоконным сенсором



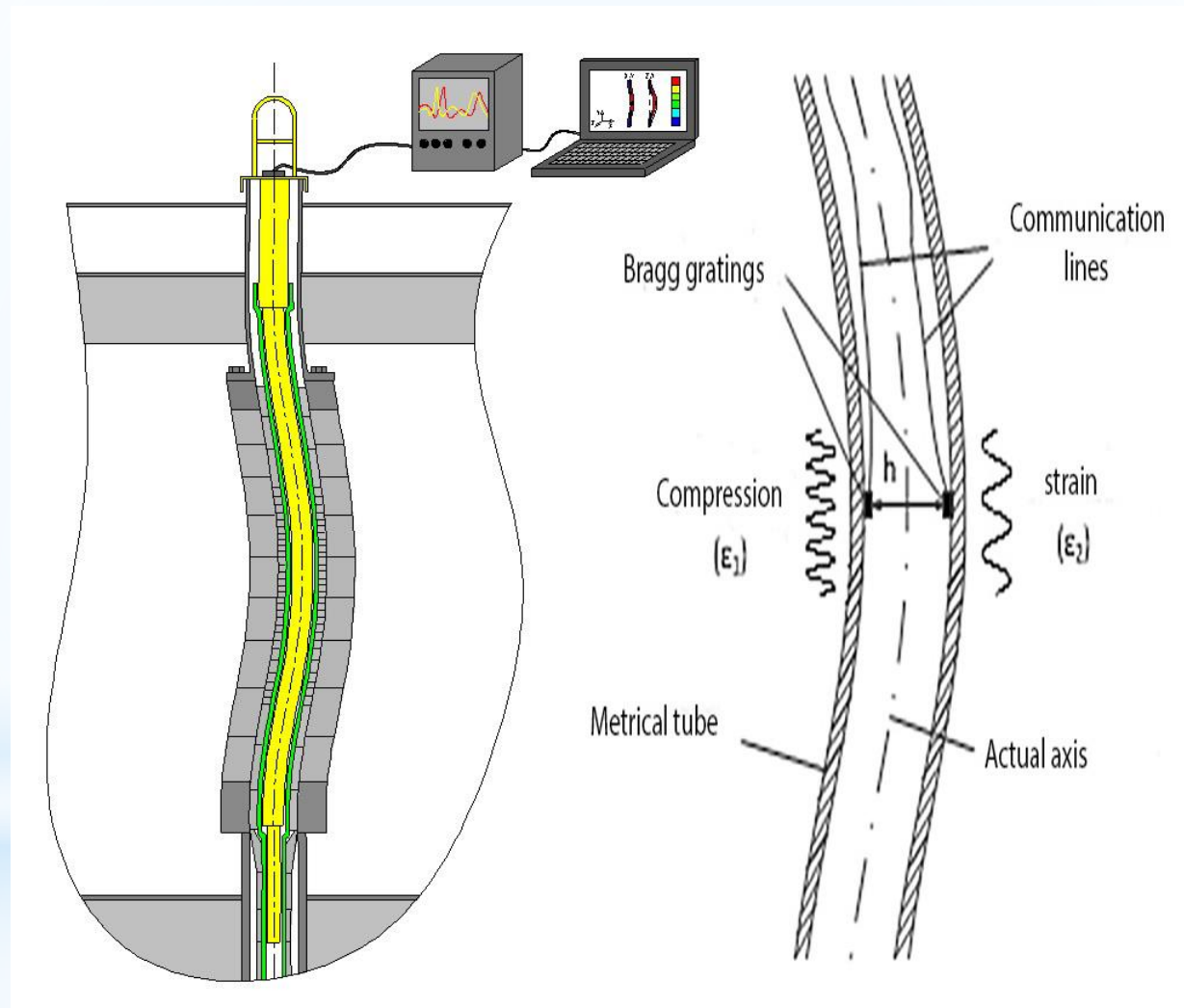
Tomyshev, K. A. *et.al. Physica status solidi (a)*, 216(3), 1800541 (2019)

Решетки в экстремальных условиях

Реактор и реакторный зал РБМК-1000



Дифференциальный датчик деформации для контроля величины изгиба каналов ядерного реактора



Тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора РБМК-1000

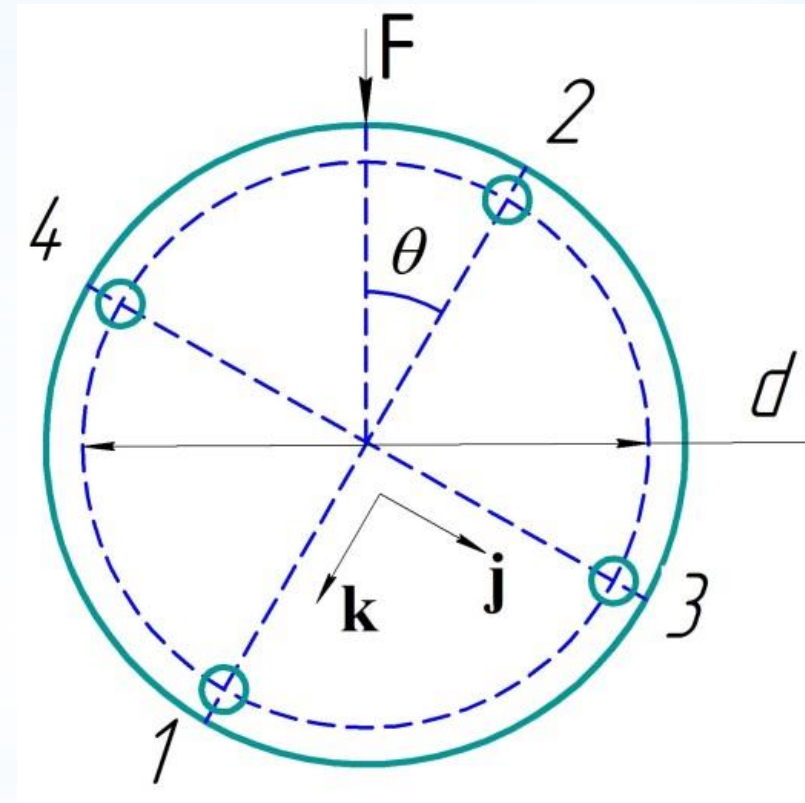
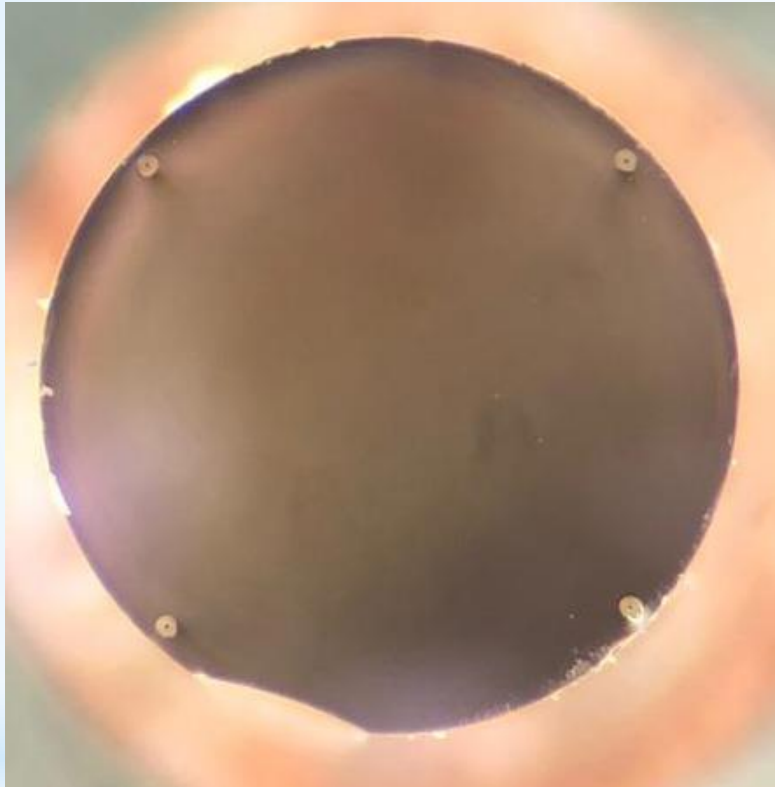


Технологические каналы – 80 мм внутр. диам.
ТВС – 18 ТВЭЛов,
центральный стержень – 6.5 мм внутр.диам.
Длина активной зоны – порядка 8 м.

Цельноволоконный датчик изгибных деформаций на основе брэгговских решеток

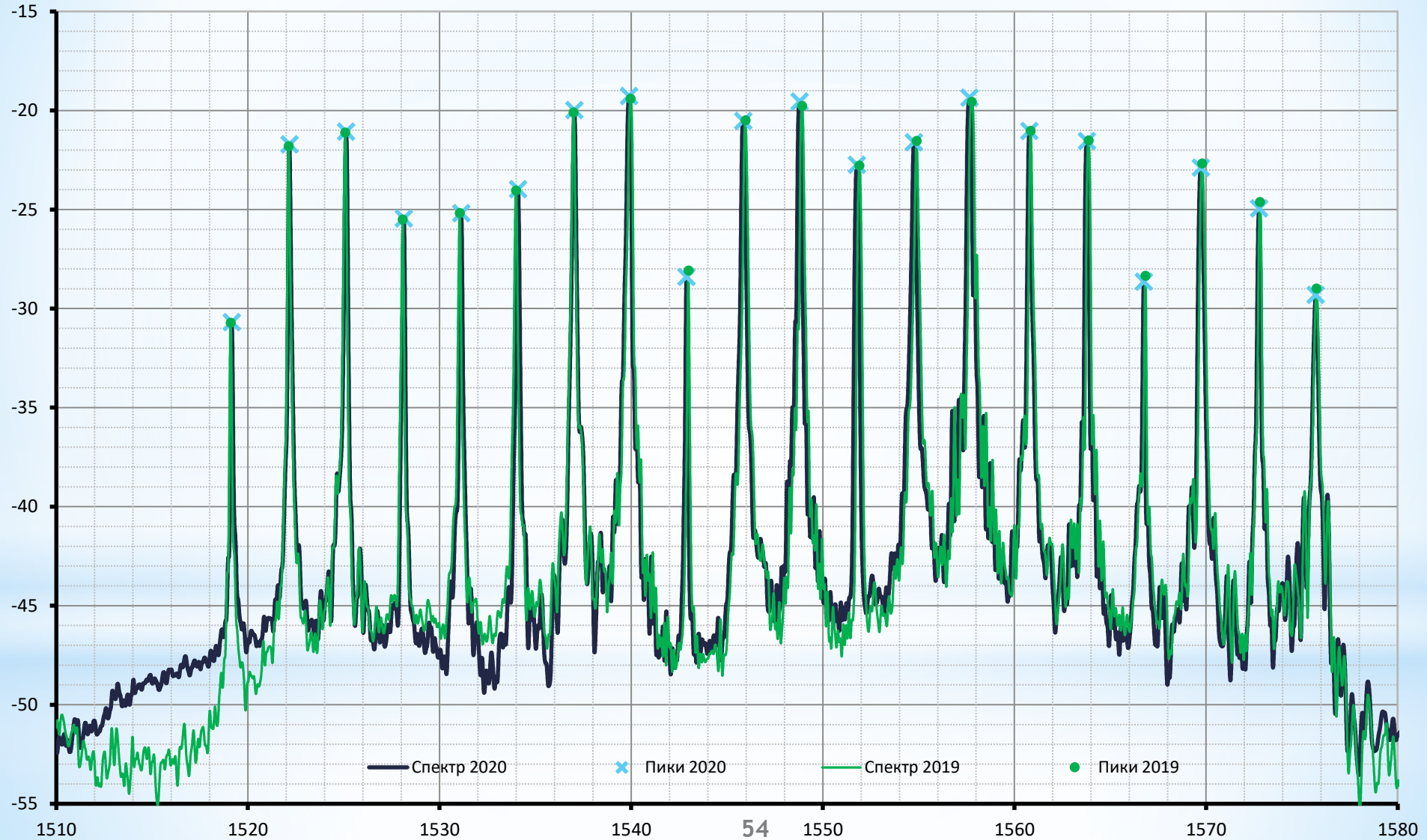


Цельноволоконный датчик изгибных деформаций на основе брэгговских решеток



$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \cos \theta \mathbf{j} + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot \sin \theta \mathbf{k}}{d}$$

Спектры отражения одной из линий датчика до- и после проведения измерений
в 41 канале реактора РБМК-1000, работающего на 100% мощности.
Суммарная доза гамма-излучения составила 2,4 МГр



Спасибо за внимание!



Бутов Олег Владиславович, д.ф.-м.н.,
зам. директора по научной работе
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН
obutov@mail.ru