

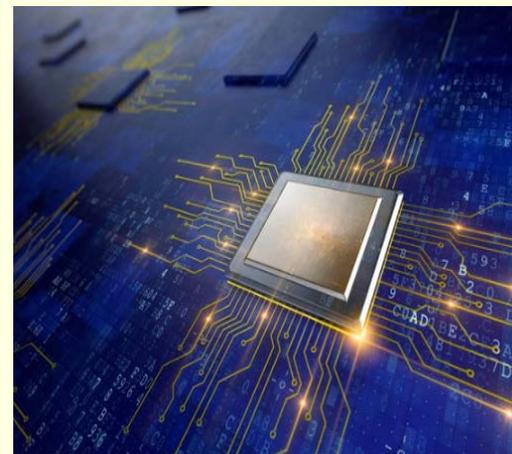


**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН**

# **Принципы и методы построения фотонных коммутационных систем с децентрализованным управлением**

**д.т.н., ведущий научный сотрудник  
лаб.№69 Барабанова Е.А.**

**Москва 2022**



# Вопросы

---

1. Принципы построения и алгоритмы работы базовых фотонных коммутаторов.
2. Схемы и алгоритмы работы «дуальных» фотонных коммутационных систем с децентрализованным управлением.
3. Математические модели для расчета сложности и быстродействия «дуальных» фотонных коммутационных систем.
4. Потери и перекрестные помехи в каналах фотонного дуального коммутатора.



# Этапы развития сетей мобильной связи

	1G	2G	3G	4G	5G	6G
	1980-е годы	1990-е годы	2000-е годы	2010-е годы	2020-е годы	2030 годы
Скорость передачи данных	2кбит/с	384кбит/с	56Мбит/с	300Мбит/с	10Гбит/с	100Гбит/с- 1Тбит/с
Время задержки	-	629 мс	212 мс	60-98 мс	<1 мс	<1 мкс



# Оптические сети

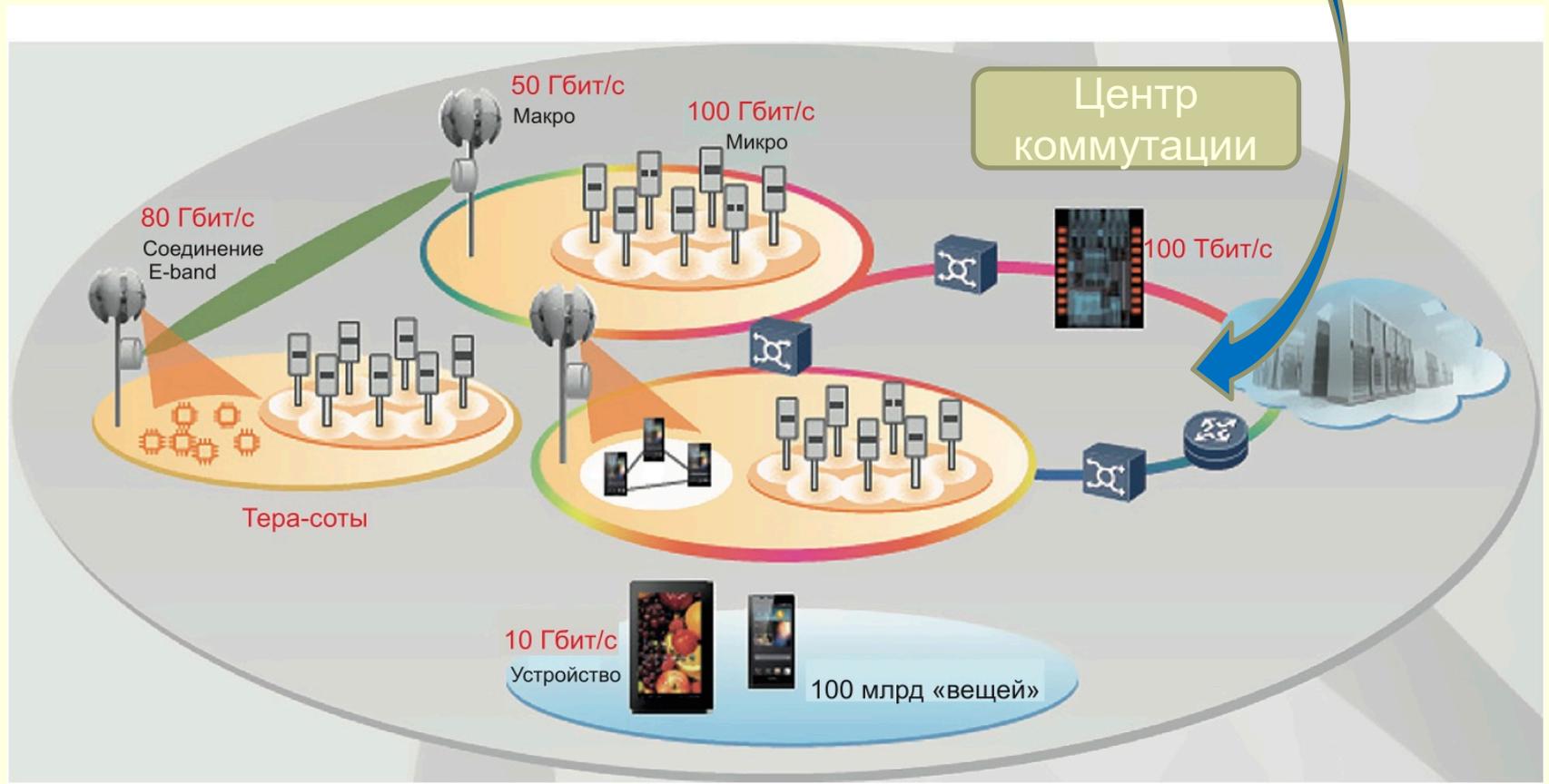


Схема построения сети 5G

# Оптические сети



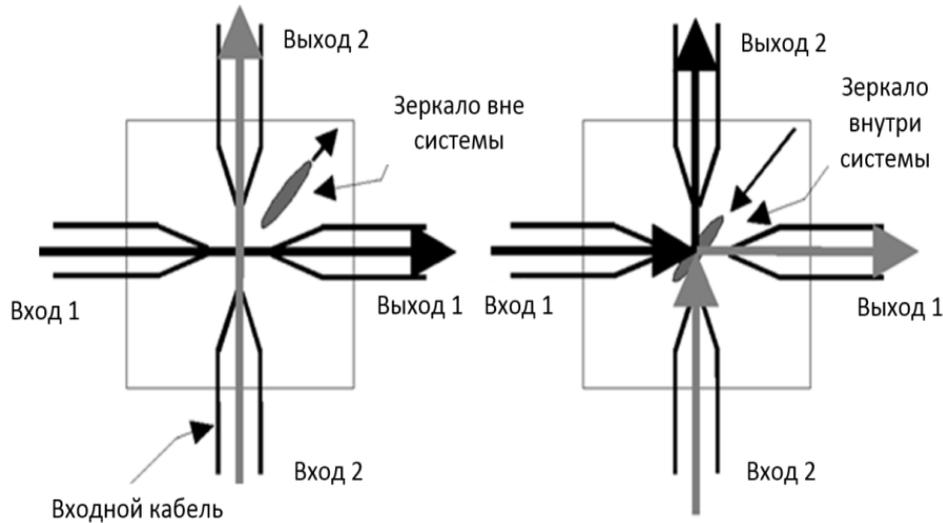
## Полностью оптические или фотонные сети



# Анализ современных технологий построения фотонных коммутаторов

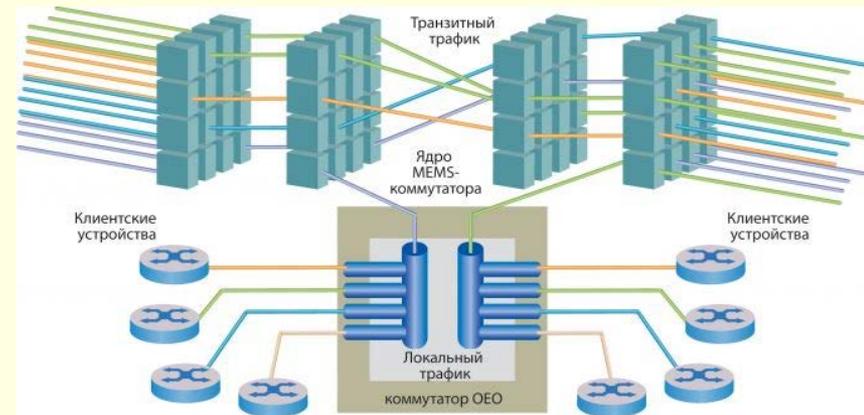
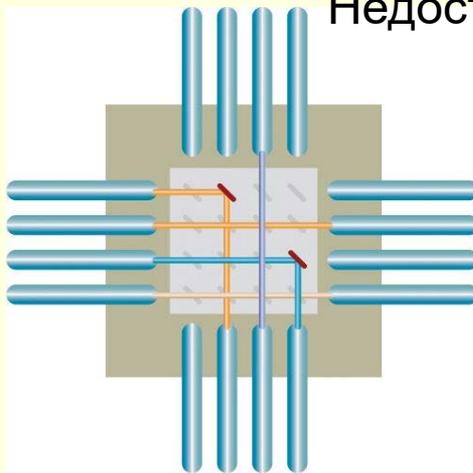
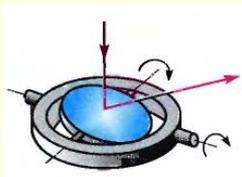
Технологии построения	Время переключения
механические оптические коммутаторы	10 - 500 мс
электрооптические коммутаторы	10–100 пс
термооптические коммутаторы	2 мс
акустооптические коммутаторы	500 нс-10 мкс
коммутаторы на фотонных кристаллах	1 нс-10 пс
коммутаторы на многослойных световодных жидкокристаллических матрицах	140 мс -300 мс

# Механические фотонные коммутаторы

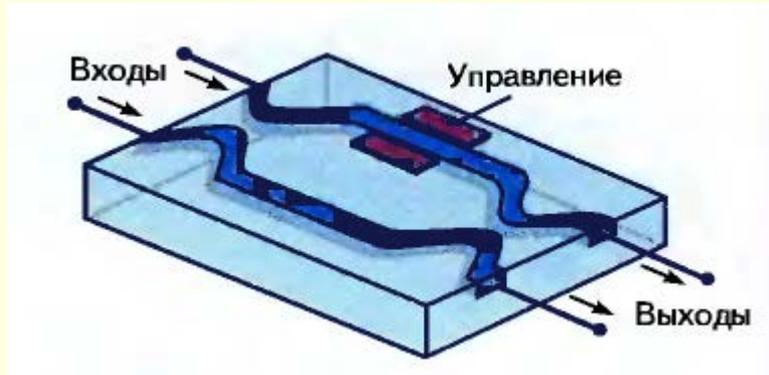


Микроэлектронные механические системы MEMS (Micro-Electro Mechanical System).

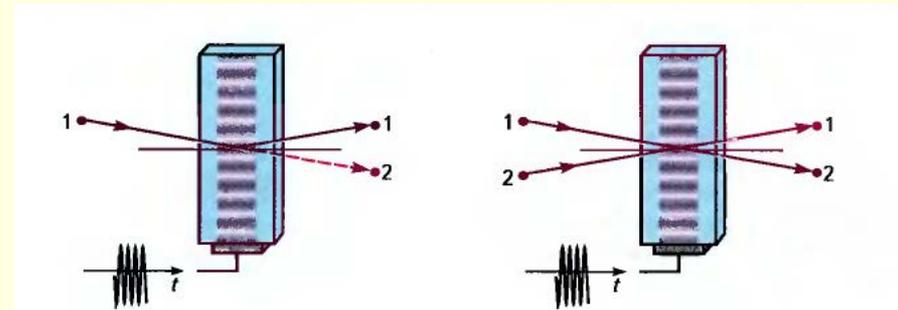
Недостаток – низкое быстродействие



# Термооптические и акустооптические фотонные коммутаторы



Термооптический коммутатор



Акустооптический коммутатор

**Недостаток-низкое  
быстродействие**

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ В ОБЛАСТИ ФОТОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

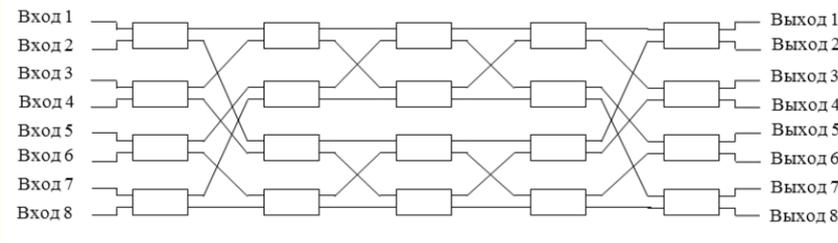
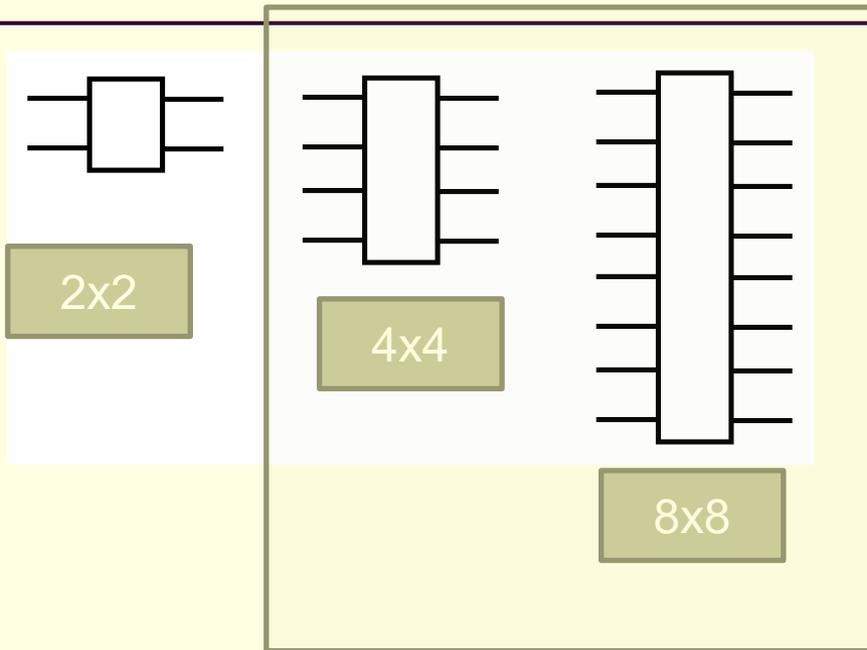


Схема Бенеша



Матричный коммутатор

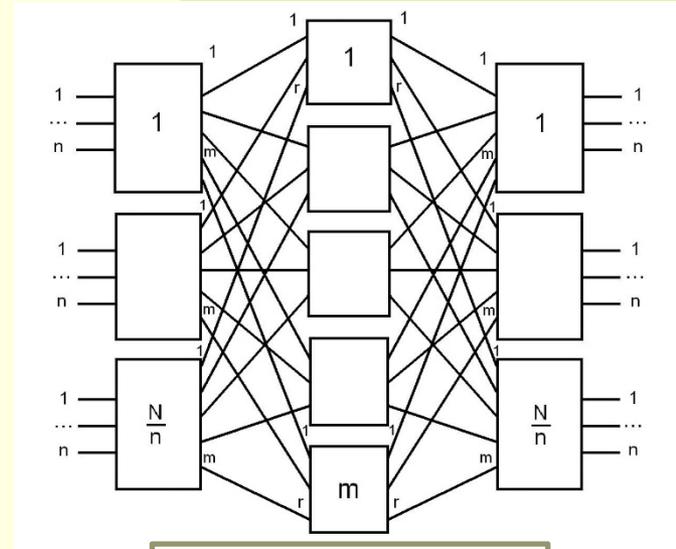
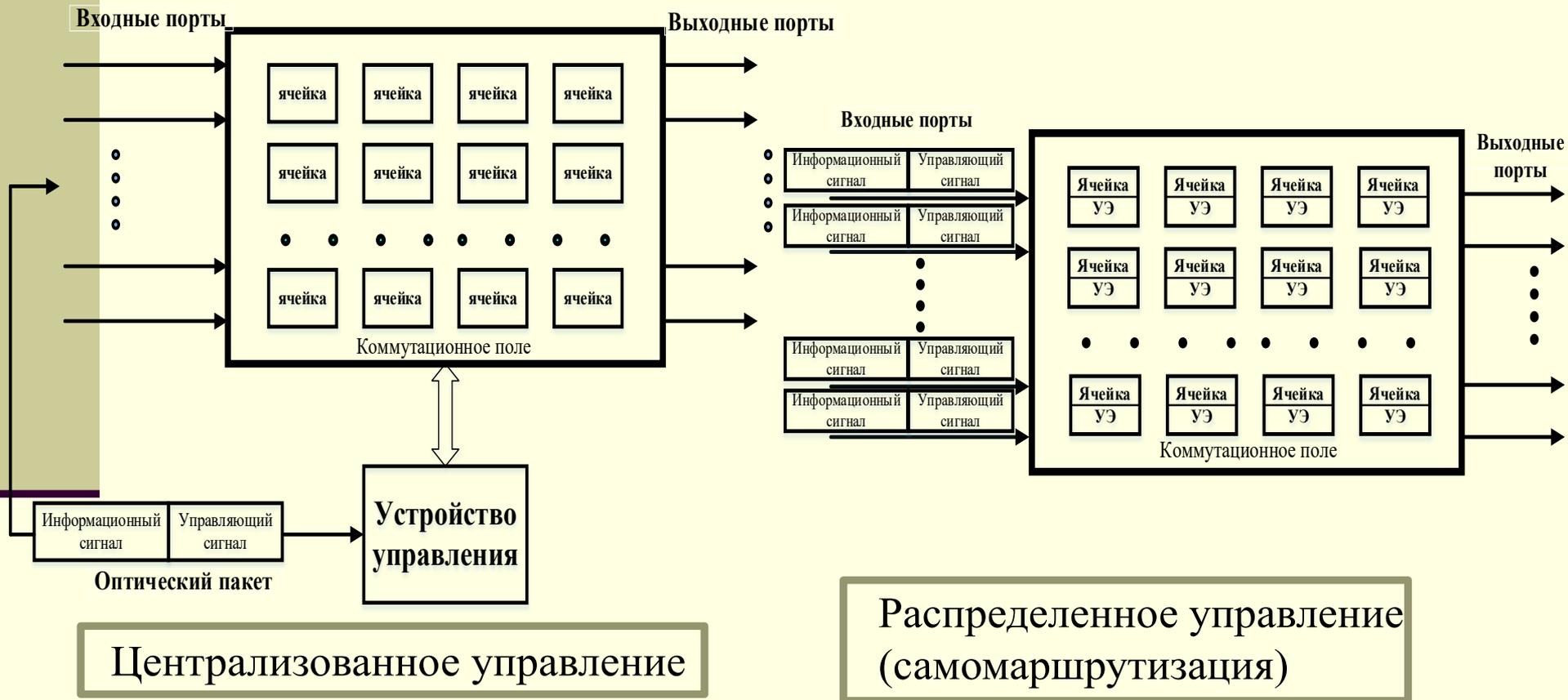


Схема Клоза

# Принципы управления фотонными коммутаторами



# БАЗОВЫЙ ФОТОННЫЙ КОММУТАТОР 4×4

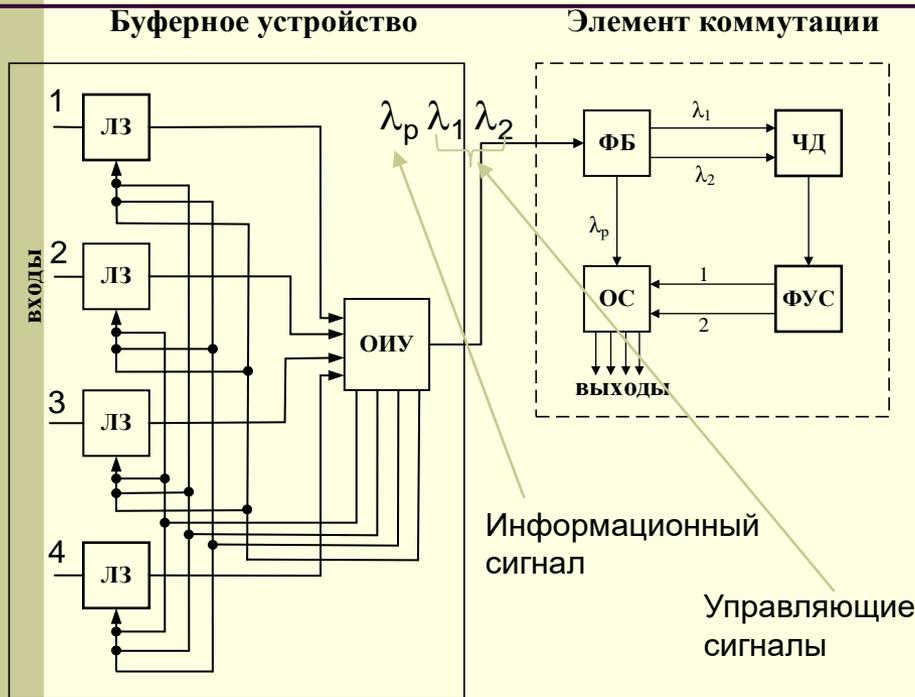
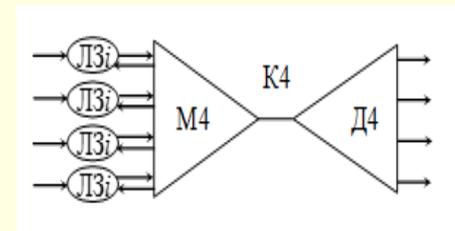


Схема фотонного коммутатора 4×4

- ЛЗ-линия задержки
- ОИУ-оптическое интегральное устройство
- ФБ-фильтр Брэгга; ЧД-частотный детектор
- ФУС-формирователь управляющего сигнала
- ОС-отклоняющая система

Таблица - Комбинации управляющих сигналов

Номер выхода	Управляющие сигналы
1	0 0
2	0 $\lambda_2$
3	$\lambda_1$ 0
4	$\lambda_1 \lambda_2$



Эквивалентная схема коммутатора 4×4

# Схема оптического коммутатора 16×16

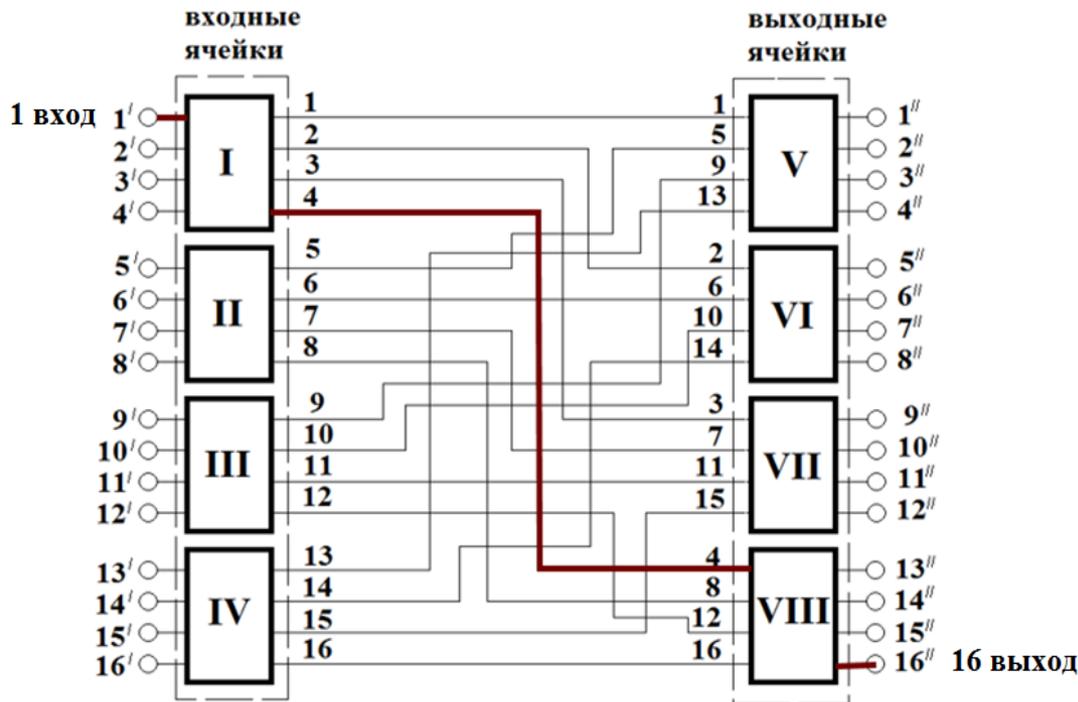


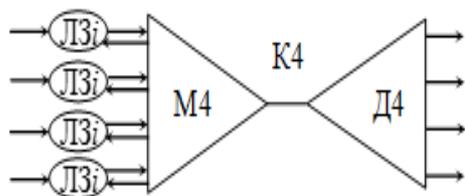
Схема оптического коммутатора 16x16

## Комбинации управляющих сигналов

Номер выхода	Управляющие сигналы	Номер выхода	Управляющие сигналы
1	0 0 0 0	9	$\lambda_1 0 0 0$
2	0 0 0 $\lambda_4$	10	$\lambda_1 0 0 \lambda_4$
...	...	...	...
7	0 $\lambda_2 \lambda_3 0$	15	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 0$
8	0 $\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$	16	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$

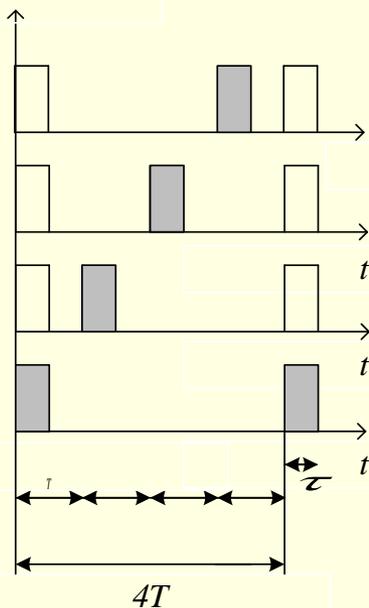
# Оценка периода сигналов для обеспечения неблокируемости коммутационной системы

## Базовый элемент К4

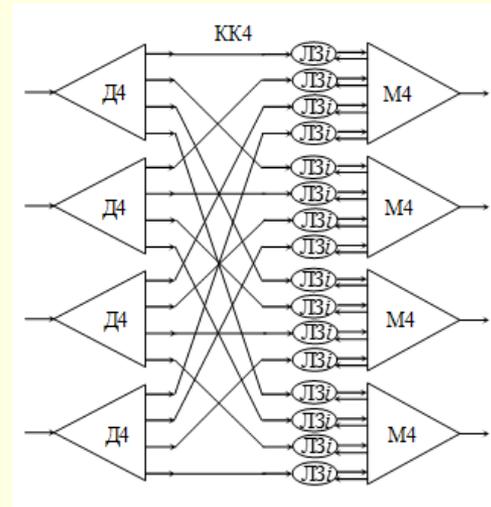


$T_1 = 4T$  - период разнесения сигналов в коммутаторе 4x4

$T_2 = 16T$  - период разнесения сигналов в коммутаторе 16x16



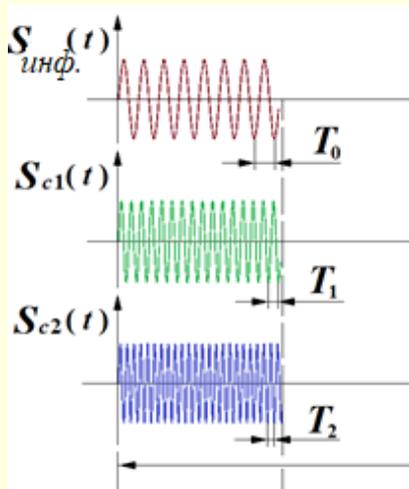
## Базовый элемент КК4



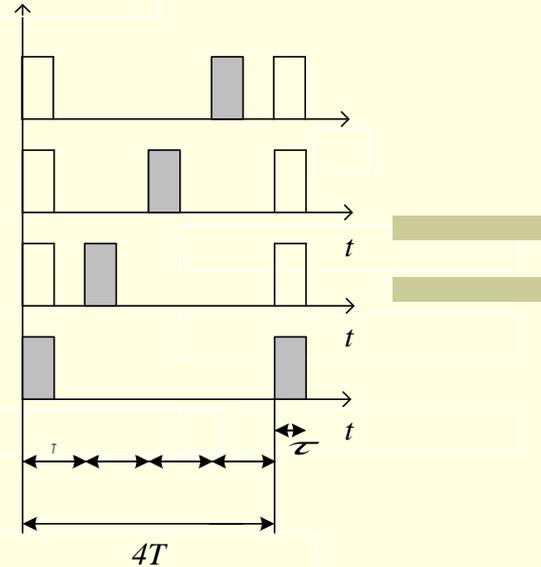
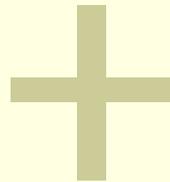
$$T_1 = 4T$$

$$T_2 = 4T = N_2^{1/2} \text{ или } T_2 = \log_2 N_2$$

# Дуальный принцип



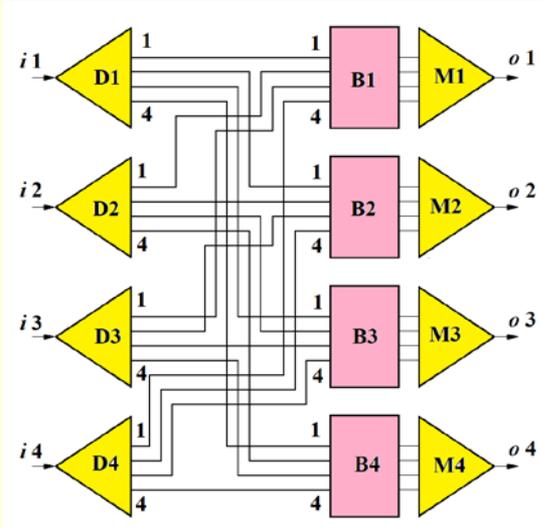
Разделение  
по частоте



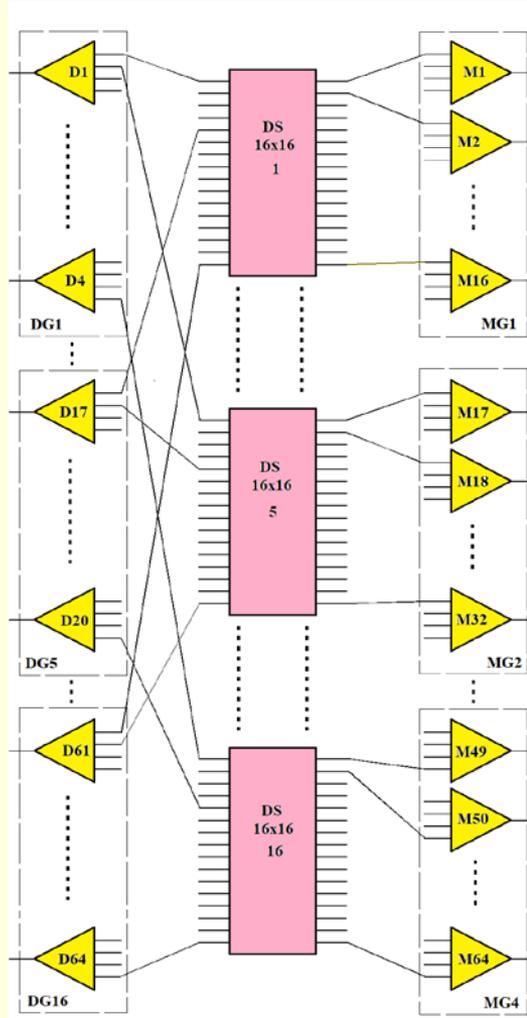
Разделение  
по времени

Дуальный  
принцип

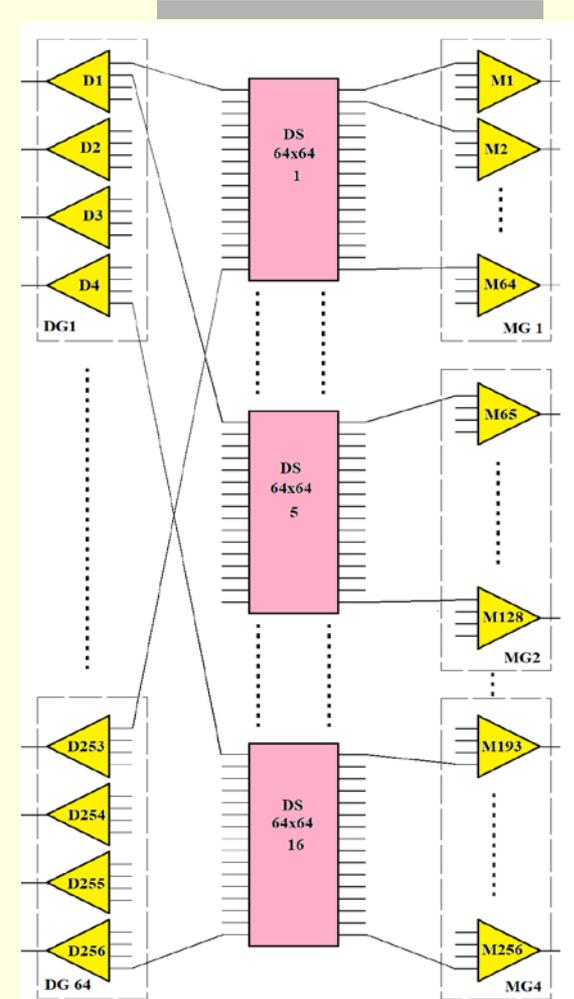
# Дуальные коммутаторы



4x4



64x64

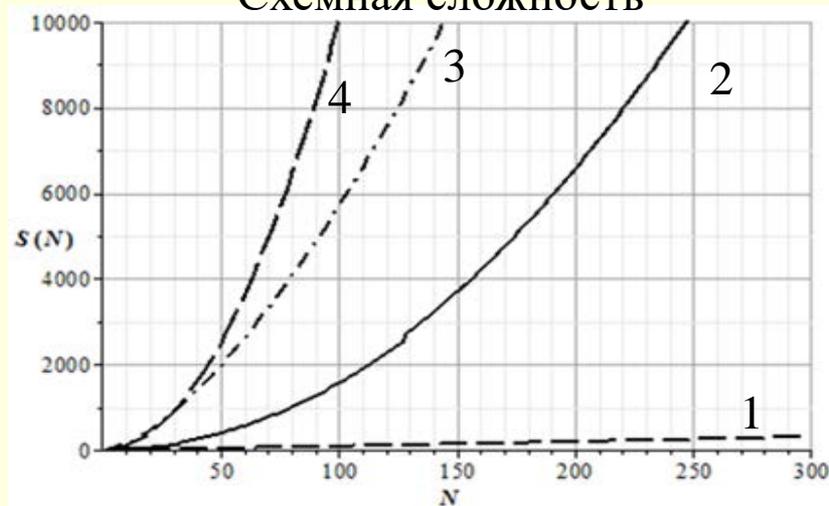


256x256

$$T_p = 4T = const$$

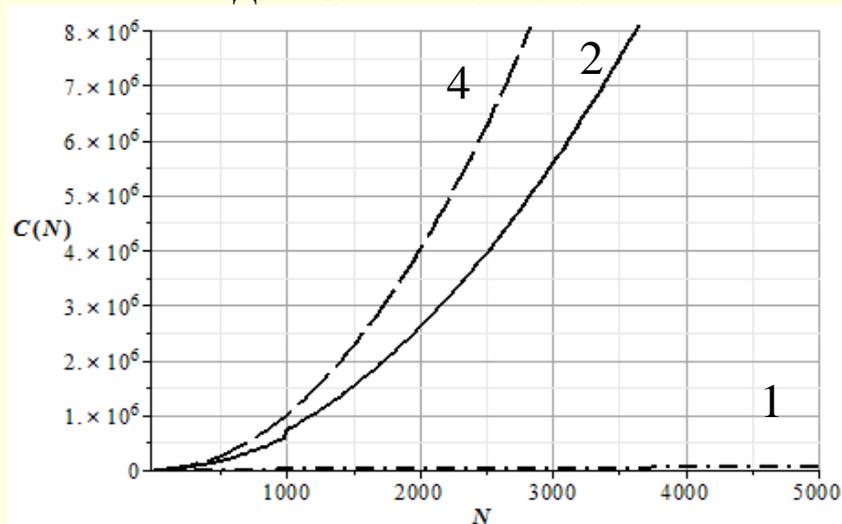
# Схемная и соединительная сложность $S$

Схемная сложность



- 1-коммутатор Баньян
- 2-квазиполные дуальные коммутаторы
- 3-коммутатор Клоза
- 4-матричный коммутатор

Соединительная сложность



$$S_N = \frac{N^2}{2} \sum_{i=1}^{\log_2(\sqrt{N})-1} \frac{1}{2^{2i}}$$

$$C_N = \left(\frac{3N}{4}\right)^2 + 2N \sum_{i=1}^{\log_2\sqrt{N}-2} 2^{2i}$$

# БАЗОВЫЙ ФОТОННЫЙ КОММУТАТОР 4×4

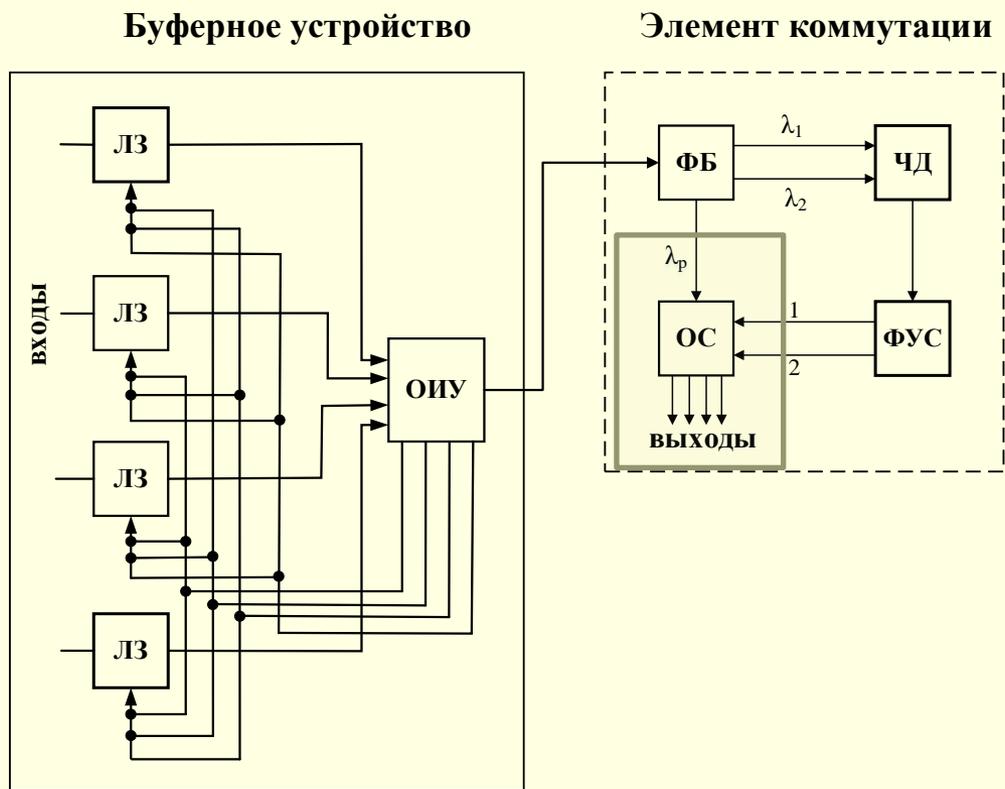


Схема фотонного коммутатора 4×4

ЛЗ-линия задержки

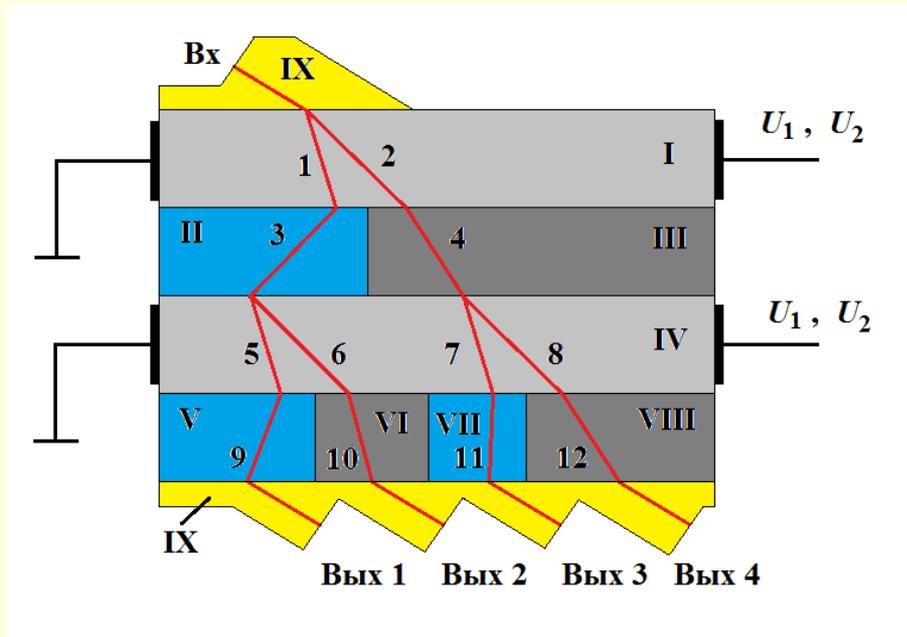
ОИУ-оптическое интегральное устройство

ФБ-фильтр Брэгга; ЧД-частотный детектор

ФУС-формирователь управляющего сигнала

ОС-отклоняющая система

# Отклоняющая система 1x4



- I** Слой ниобата лития
- II** Слой метаматериала
- III** Слой диэлектрика
- IV** Слой ниобата лития
- V** Слой метаматериала
- VI** Слой диэлектрика
- VII** Слой метаматериала
- VIII** Слой диэлектрика
- IX** Согласующий слой

Структура отклоняющей системы

**E. Barabanova, K. Vytovtov, V. Podlazov.** Model and algorithm of next generation optical switching systems based on 8x8 elements//Lecture Notes in Computer Science series. - 2019.- P. 58-70.-DOI: 10.1007/978-3-030-36614-8\_5.

**K. Vytovtov, E. Barabanova, S. Zouhdi.** Optical Switching Cell Based On Metamaterials And Ferrite Films // 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena – Metamaterials 2018, Espoo, Finland, Aug. 27th – Sept. 1st, 2018.- P.424-426.

# Расчет коэффициентов отражения и прохождения

1 Построение матрицы преобразования и нахождение коэффициентов отражения для изотропной структуры

$$R = \frac{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha - \rho_0 m_{22} \cos \alpha}{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha + \rho_0 m_{22} \cos \alpha} \quad \text{-коэффициент отражения}$$

$$T = \frac{2\rho_0 \cos \alpha}{\rho_0 m_{11} \cos \alpha + \rho_0^2 m_{12} + m_{21} \cos^2 \alpha + \rho_0 m_{22} \cos \alpha} \quad \text{-коэффициент прохождения}$$

где  $\rho_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  - волновое сопротивление вакуума

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \quad \text{-матрица преобразования}$$

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} \cos k_z z & -\frac{j\omega\epsilon}{k_z} \sin k_z z \\ -\frac{jk_z}{\omega\epsilon} \sin k_z z & \cos k_z z \end{vmatrix} \quad \mathbf{M}_\Sigma = \prod_{i=1}^N \mathbf{M}_i$$

где  $\mathbf{M}_i$  - матрица  $i$ -го слоя,  $N$  - количество слоев в структуре,  $\mathbf{M}_\Sigma$  - результирующая матрица преобразования.

# Расчет коэффициентов отражения и прохождения

1 Построение матриц отражения и прохождения для анизотропной структуры

$$\begin{pmatrix} E_{\text{пр } x} \\ H_{\text{пр } y} \\ E_{\text{пр } y} \\ H_{\text{пр } x} \end{pmatrix} = \mathbf{L}(\Lambda) \begin{pmatrix} E_{\text{пад } x} + E_{\text{отр } x} \\ H_{\text{пад } y} + H_{\text{отр } y} \\ E_{\text{пад } y} + E_{\text{отр } y} \\ H_{\text{пад } x} + H_{\text{отр } x} \end{pmatrix}$$

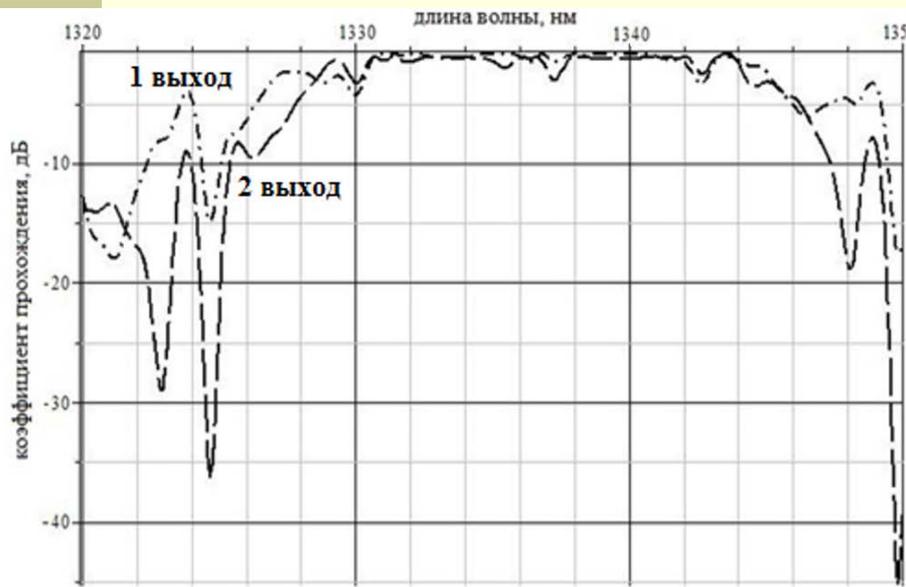
$$\begin{pmatrix} H_{\text{отр } TE} \\ H_{\text{отр } TM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} H_{\text{пр } TE} \\ H_{\text{пр } TM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix}$$

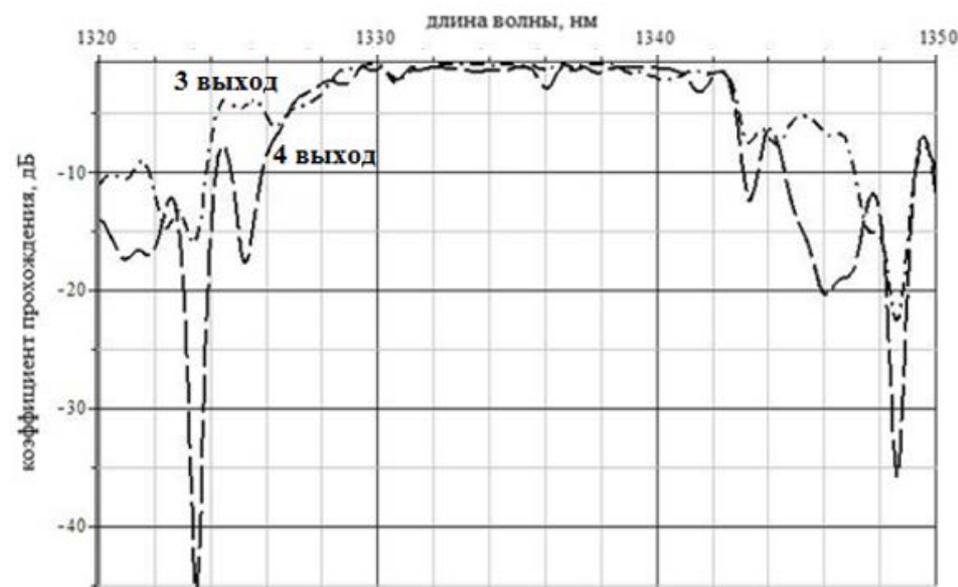
$$R_{TE}^+ = \frac{H_{\text{отр}}^+}{H_{\text{пад } TE}} = \frac{jR_{11} + R_{21}}{2}$$

$$R_{TE}^- = \frac{H_{\text{отр}}^-}{H_{\text{пад } TE}} = \frac{-jR_{11} + R_{21}}{2}$$

# Коэффициенты прохождения информационного сигнала через отклоняющую систему

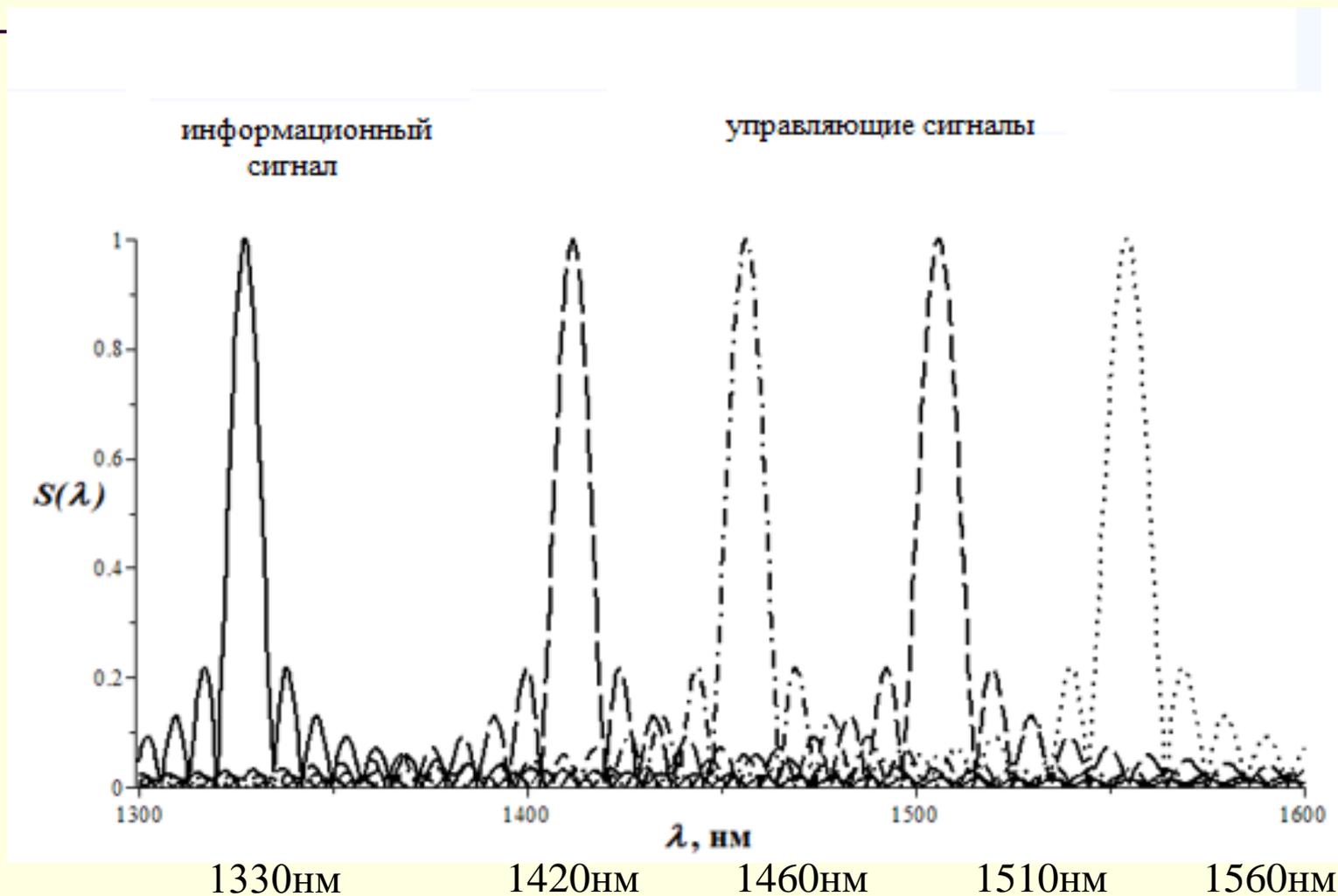


Зависимость коэффициентов  
прохождения оптического луча для 1  
и 2 выходов отклоняющей системы



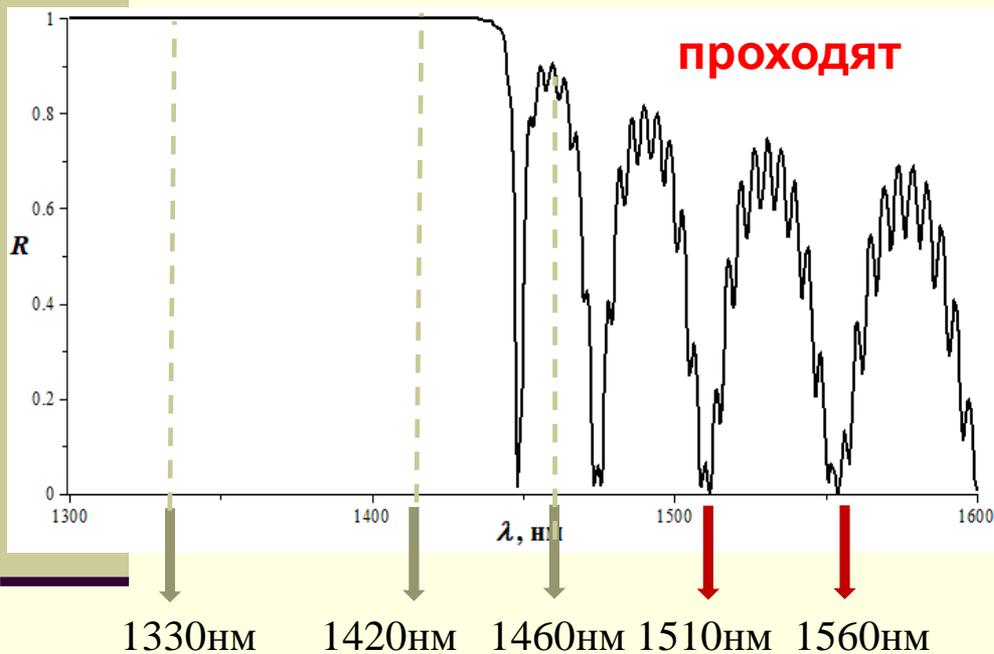
Коэффициенты прохождения оптического  
луча для 3 и 4 выходов отклоняющей  
системы

# АЧХ сигналов в дуальной фотонной коммутационной системе 16×16



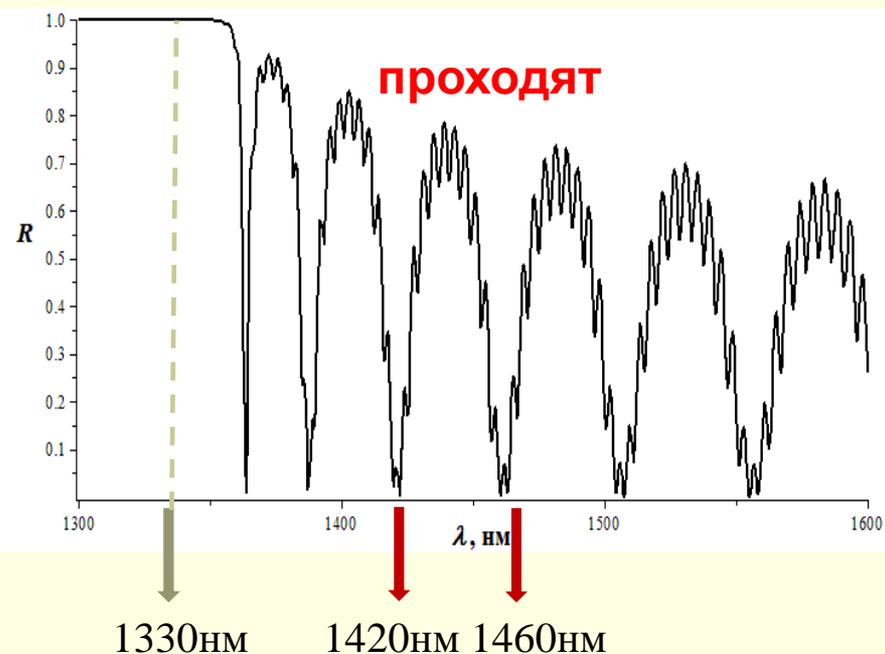
# АЧХ фильтров Брэгга в фотонной коммутационной ячейке с децентрализованным управлением

отражаются



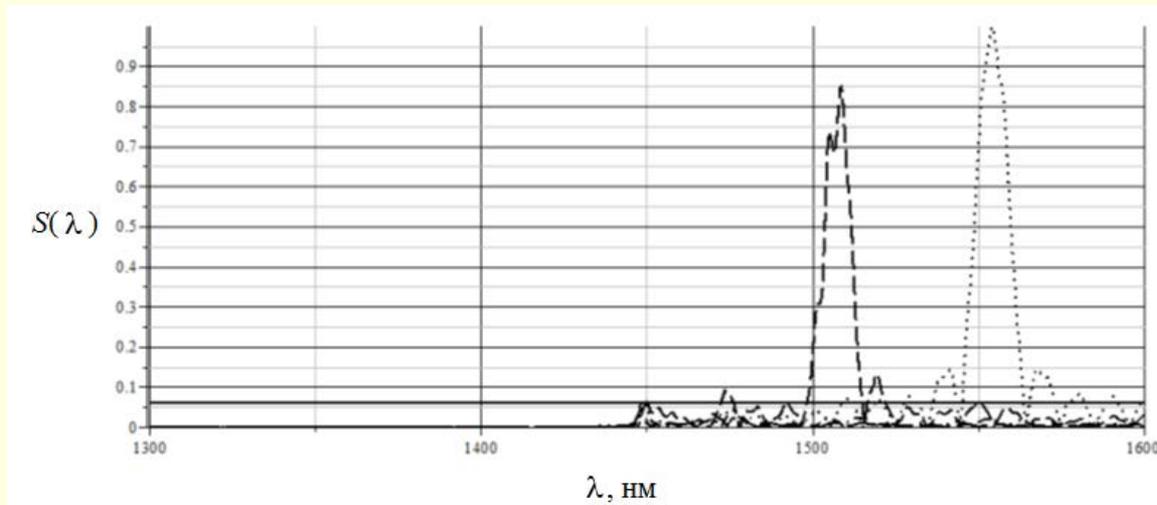
АЧХ фильтра Брэгга первого каскада

отражается

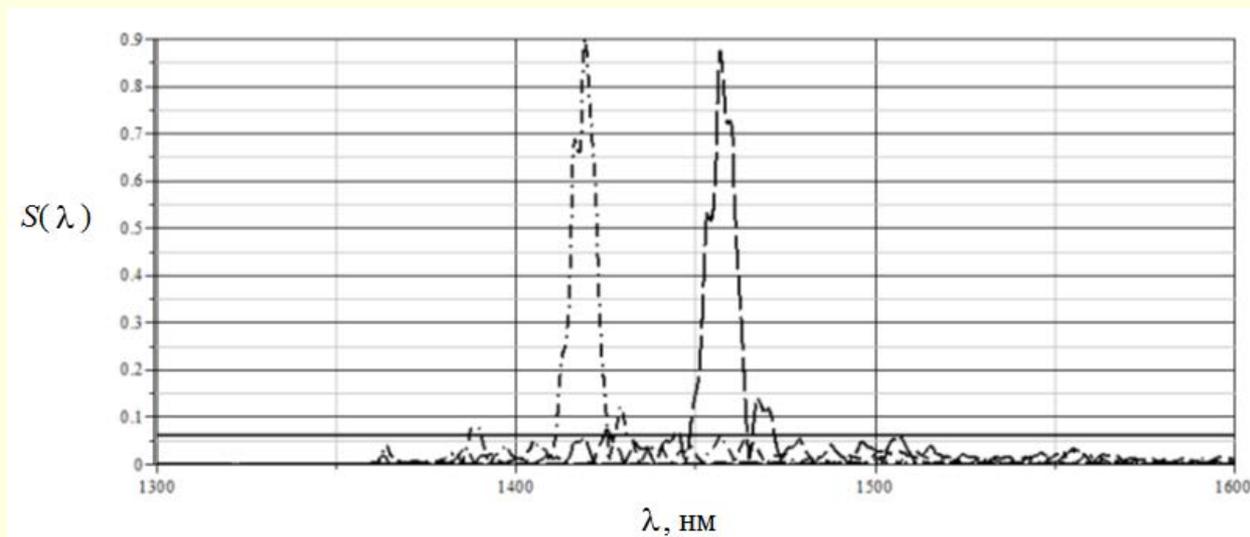


АЧХ фильтра Брэгга второго каскада

# Спектры прошедших управляющих сигналов

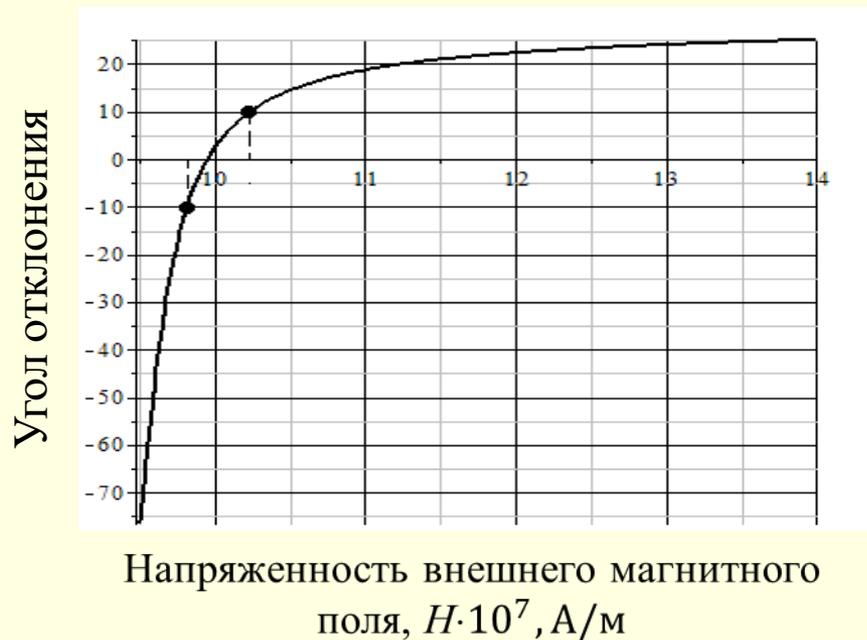
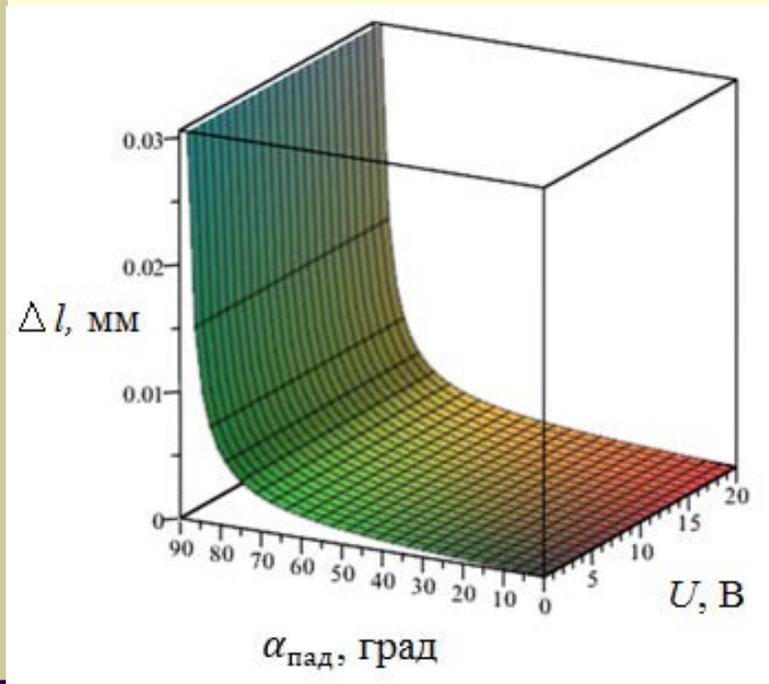


на выходе фильтра  
Брэгга 1 каскада



на выходе фильтра  
Брэгга 2 каскада

# Пространственное отклонение луча



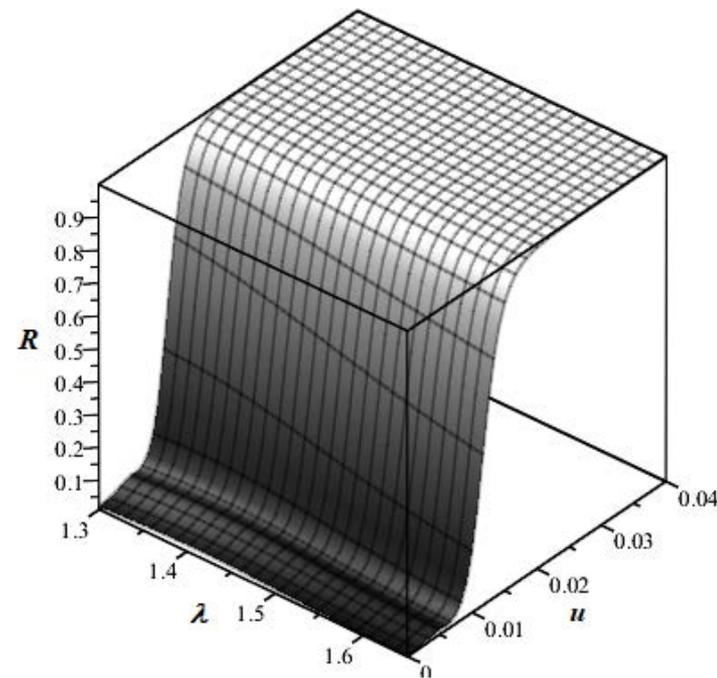
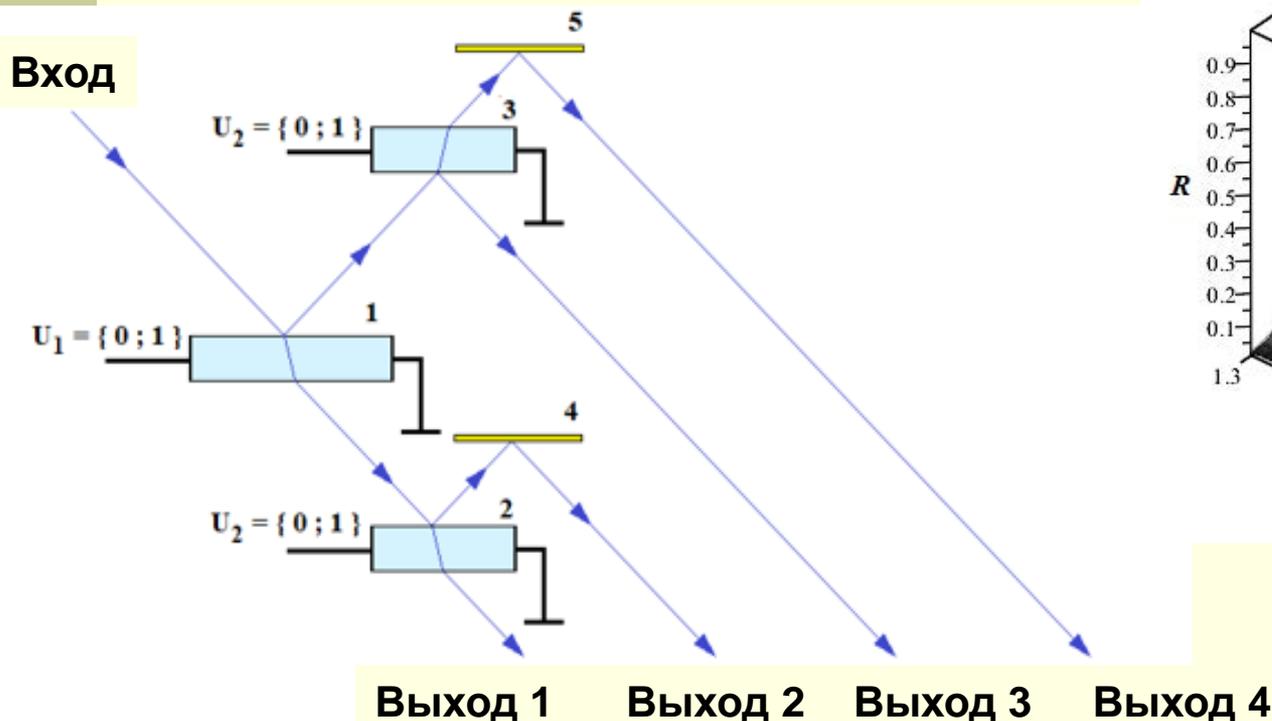
Зависимость пространственного отклонения от напряжения и угла падения при толщине слоя 1 мм для ниобата лития

$$\Delta l = d \tan \alpha_{\text{пр}} = d \tan \left[ \arcsin \left( \frac{n_0}{n_0 - \frac{rn^3U}{2d}} \sin \alpha_{\text{пад}} \right) \right] =$$

$$= d \tan \left[ \arcsin \left( \frac{2dn_0}{2dn_0 - rn^3U} \sin \alpha_{\text{пад}} \right) \right] \quad 25$$

# Фотонная коммутационная ячейка

## Структура фотонной ячейки



**Зависимость  
коэффициента  
отражения от длины  
волны и управляемого  
напряжения**

1,2,3 – слоистые структуры, включающие слои обычного диэлектрика и ниобата лития  
4,5 – абсолютно отражающие структуры

K.A. Vytovtov, E.A. Barabanova and V.M. Vishnevsky. High-performance 1×4 - demultiplexer for next-generation all-optical telecommunication systems // Journal of Physics: Conference Series.-2127, 2021<sub>26</sub> 012068.

# Методика расчета быстродействия фотонных коммутационных систем

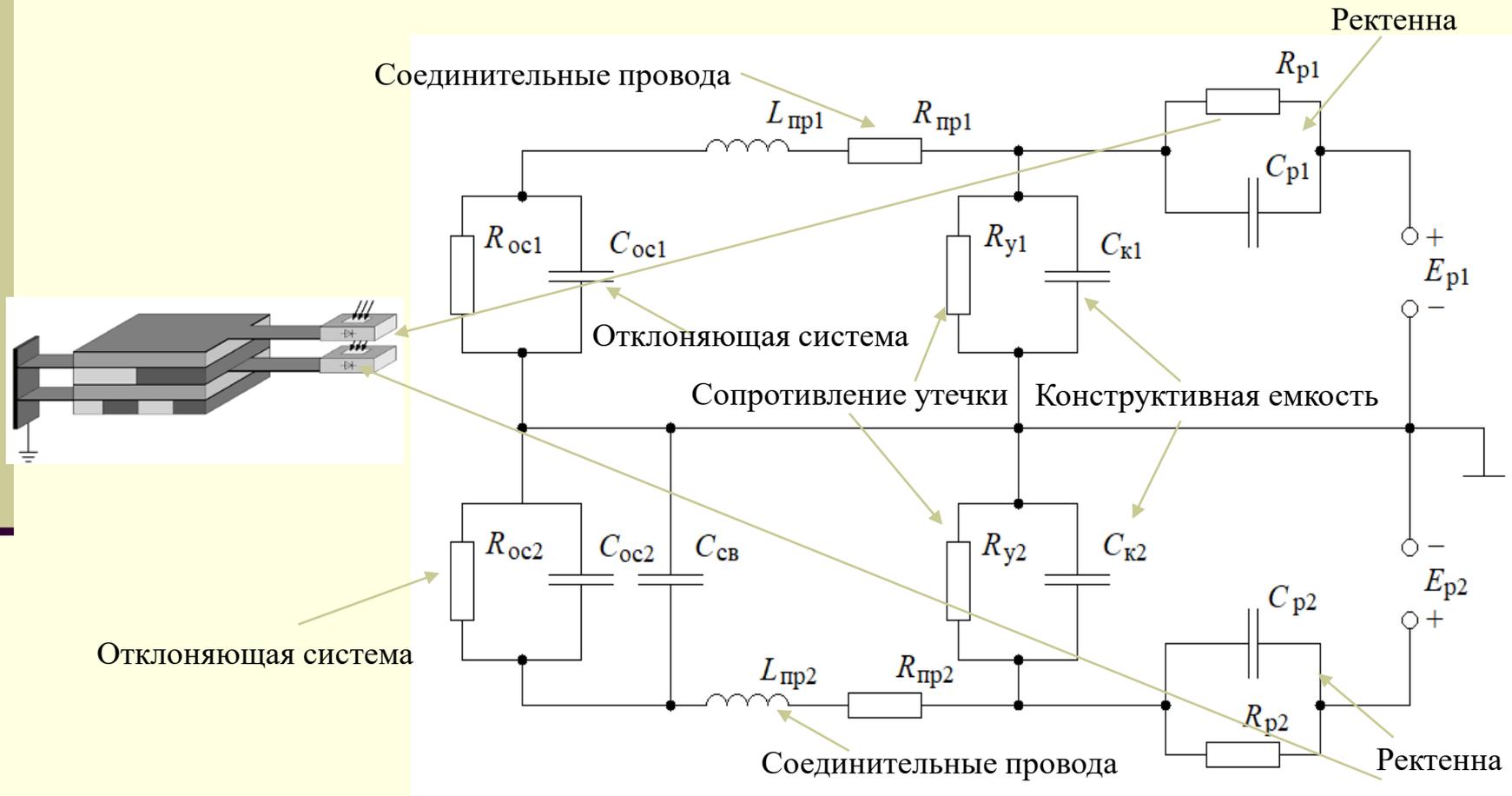
**Время задержки определяется следующими факторами:**

- 1) Временем прохождения оптического сигнала в оптических структурах устройств
- 2) Временем задержки сигнала на границах раздела сред и других неоднородностях
- 3) Временем переходных процессов в цепях управляющего электрического (магнитного) сигналов
- 4) Временем срабатывания электронных схем управления (фотодиоды, фототранзисторы, ректенны).

$$t_3 = \sum_{i=1}^N t_{\text{пр } i} + \sum_{j=1}^M t_{\text{гр } j} + \sum_{k=1}^K t_{\text{пп } k} + \sum_{l=1}^L t_{\text{эу } l}$$

где  $t_{\text{пр } i}$  - время прохождения оптического сигнала в  $i$ -м устройстве схемы,  $t_{\text{гр } j}$  - время задержки, определяемое сдвигом фаз на  $j$ -й границе раздела на пути прохождения светового излучения,  $t_{\text{пп } k}$  - время переходного процесса в  $k$ -й цепи управления,  $t_{\text{эу } l}$  - время срабатывания  $l$ -й схемы управления.

# 1. Время переходных процессов в цепях управляющих электрических сигналов



Эквивалентная схема системы управления на ректенне

# 1. Время переходных процессов в цепях управляющих электрических сигналов

Дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс для тока в общей ветви цепи питания первого слоя:

$$\begin{aligned} R_y R_p R_{oc} L_{пр} C_{oc} (C_k + C_p) \frac{d^3 I_{общ}}{dt^3} + \{ R_y R_p R_{oc} R_{пр} C_{oc} (C_k + C_p) + \\ L_{пр} [ R_p (C_k R_y + C_{oc} R_{oc}) + R_y (C_{oc} R_{oc} + C_p R_p) ] \} \frac{d^2 I_{общ}}{dt^2} + \\ [ R_p R_y (R_{пр} + R_{oc}) (C_k + C_p) \\ + (R_p + R_y) (R_{пр} R_{oc} C_{oc} + R_p R_y C_p + L_{пр}) \\ + R_y R_p R_{oc} C_{oc} ] \frac{d I_{общ}}{dt} + [ (R_p + R_y) (R_{пр} + R_{oc}) + R_p R_y ] I_{общ} = E \end{aligned}$$

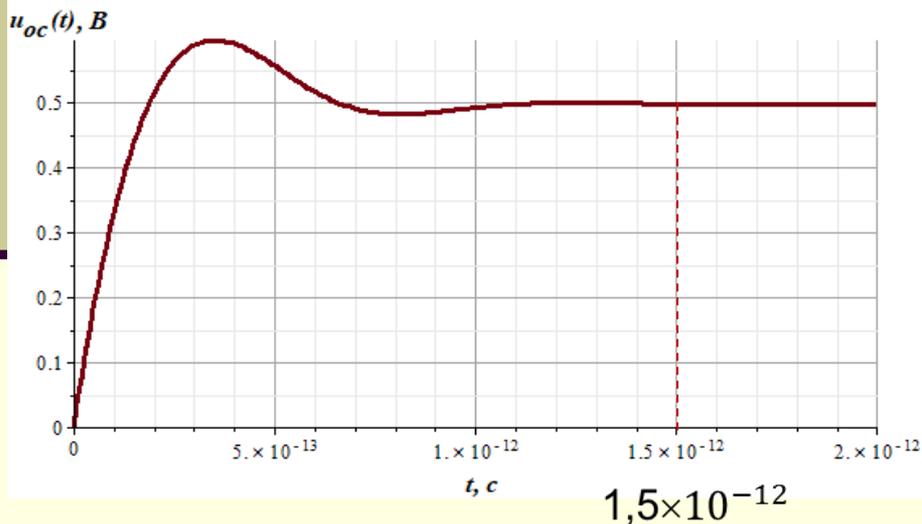
# 1. Время переходных процессов в цепях управляющих электрических сигналов

$$U_{Coc}(t) = \frac{ER_y R_{oc}}{R_y(R_{np} + R_{oc}) + R_p(R_y + R_{np} + R_{oc})} + \sum_{i=1}^3 D_i A_i e^{p_i t}$$

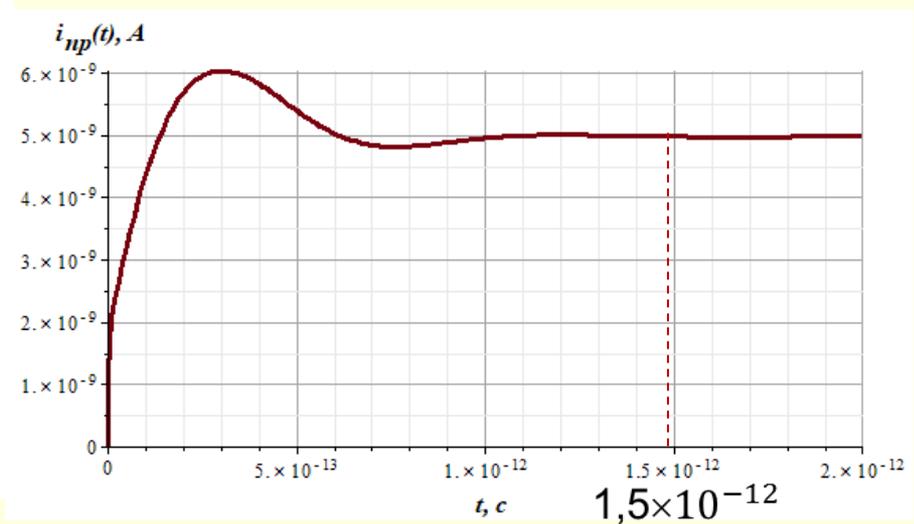
- напряжение на отклоняющей системе

$$I_{Lnp} = \frac{ER_y}{R_y(R_{np} + R_{oc}) + R_p(R_y + R_{np} + R_{oc})} + \sum_{i=1}^3 B_i A_i e^{p_i t}$$

- ток в цепи питания



Переходная характеристика по напряжению



Переходная характеристика по току

## 2. Расчет времени прохождения оптического сигнала в оптических структурах коммутационных устройств

$$t = \frac{(2dn_0 - rn^3U)d}{2dn_0c \cos \left\{ \arcsin \left[ \left( \frac{2dn_0}{2dn_0 - rn^3U} \right) \sin \alpha_{\text{пад}} \right] \right\}}$$

$n$  - коэффициентом преломления при произвольном угле падения;

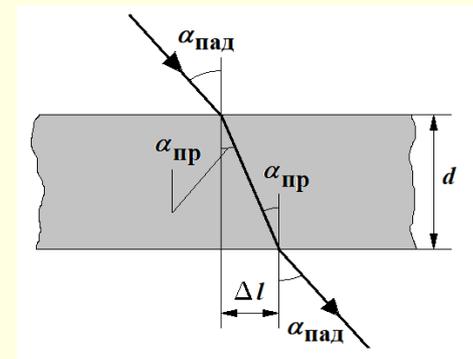
$\alpha_{\text{пад}}$  - угол падения на пластину;

$d$  - толщина пластины;

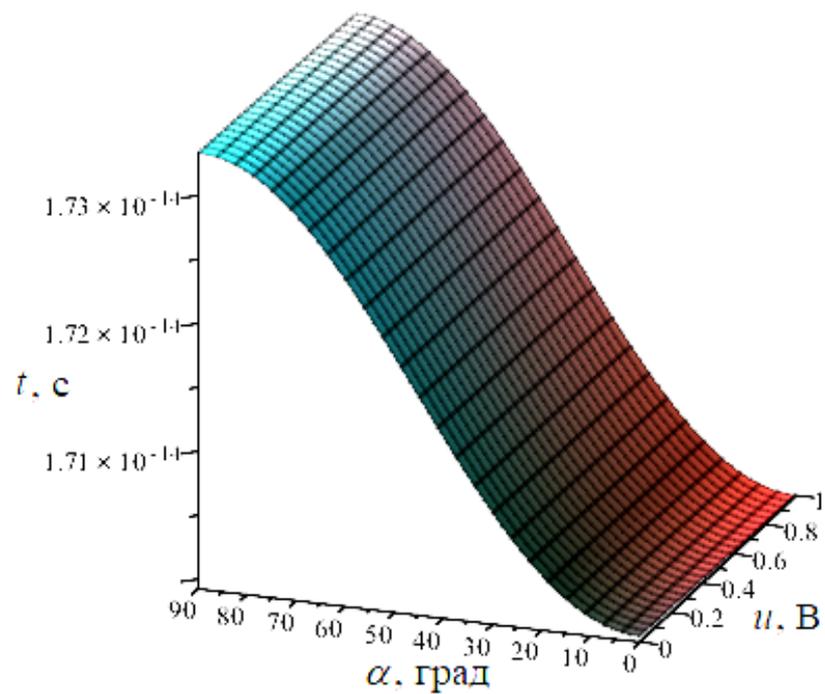
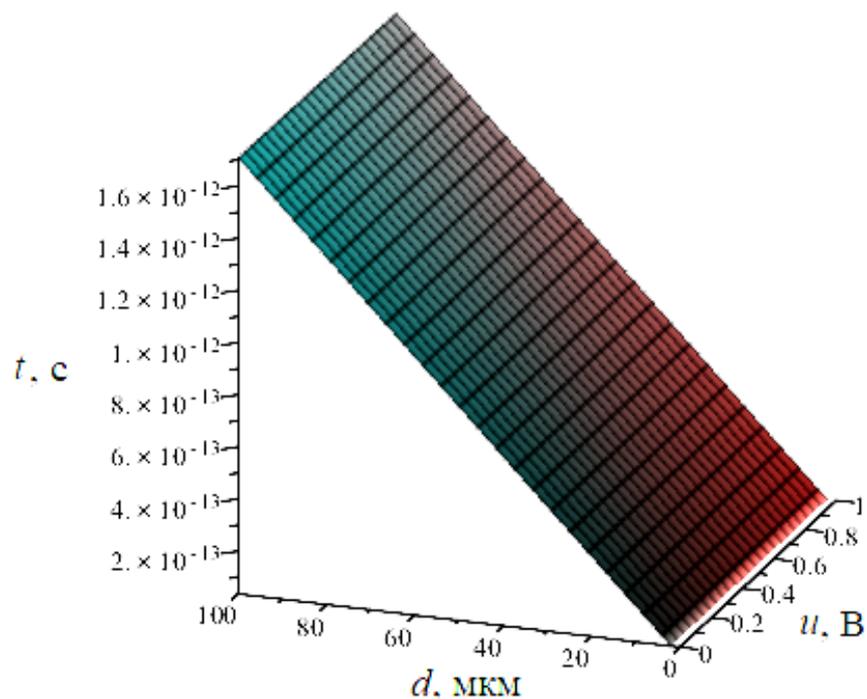
$U$  - приложенное напряжение;

$n_0$  - коэффициент преломления выходной среды;

$r$  - коэффициент Погкельса.



## 2. Расчет времени прохождения оптического сигнала в оптических структурах коммутационных устройств



Зависимость величины задержки сигнала

а) от напряжения и толщины слоя

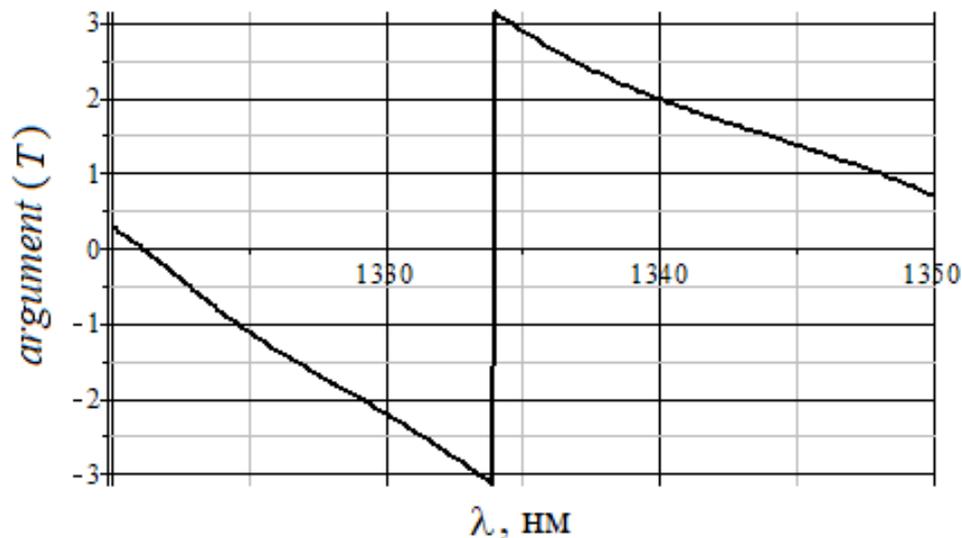
б) от напряжения и угла падения

( $d=1$  мкм)

$t_{\Sigma} = 1.68 \cdot 10^{-13}$  с – суммарное время прохождения через четырехслойную пластину

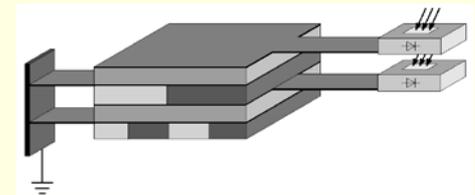
### 3. Расчет задержки сигнала на границах раздела сред и других неоднородностях

Тангенс угла наклона касательной к фазо-частотной характеристике коэффициента прохождения в данной точке равен времени задержки сигнала.



Фазо-частотная характеристика четырехслойной отклоняющей системы

На интервале  $\lambda = 1320 \div 1350$  нм минимальная задержка составила  $t_{\text{гр мин}} \approx 0.02 \cdot 10^{-17}$  с, максимальная задержка составила  $t_{\text{гр макс}} \approx 0.06 \cdot 10^{-17}$  с.



# Суммарная задержка сигнала в отклоняющей системе

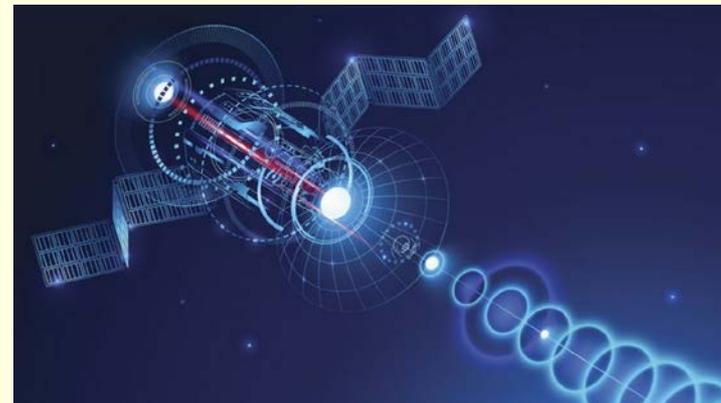
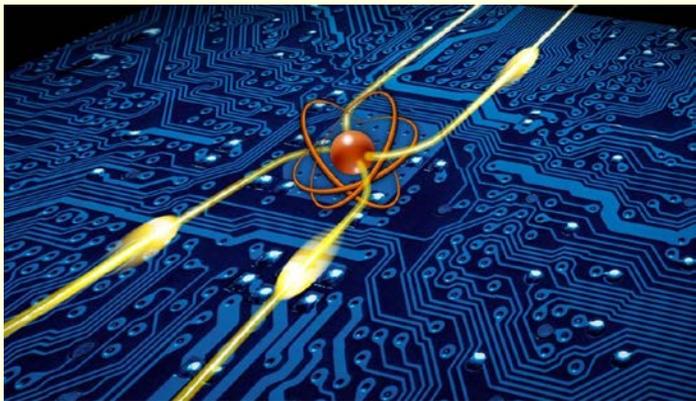
Задержка сигнала в отклоняющей системе составила:

$$t_3 = t_{\text{пр}} + t_{\text{гр}} + t_{\text{пп}} + t_{\text{ЭУ}} = 1.68 \cdot 10^{-13} + 0.06 \cdot 10^{-17} + 1.5 \cdot 10^{-12} + 0.6 \cdot 10^{-13} \approx 2.27 \cdot 10^{-12} \text{ с.}$$

Результатирующее расчетное время задержки сигнала в элементе коммутации не превышает  $3 \cdot 10^{-12}$  с, что на порядок меньше времени задержки сигнала в существующих оптических коммутационных ячейках.

# Задачи дальнейшего исследования

- Проведение экспериментальных исследований
- Работа по поиску и выбору оптимальных схем фотонных коммутаторов для увеличения разнесения каналов и увеличения быстродействия
- Разработка ректенны для элемента коммутации
- Разработка оптических буферных устройств



*Спасибо*

---

за внимание