

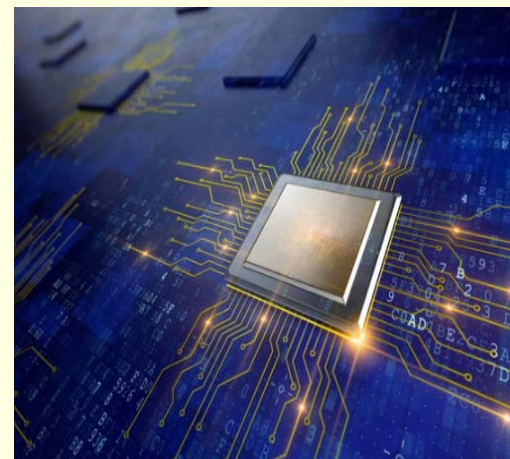


**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН**

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

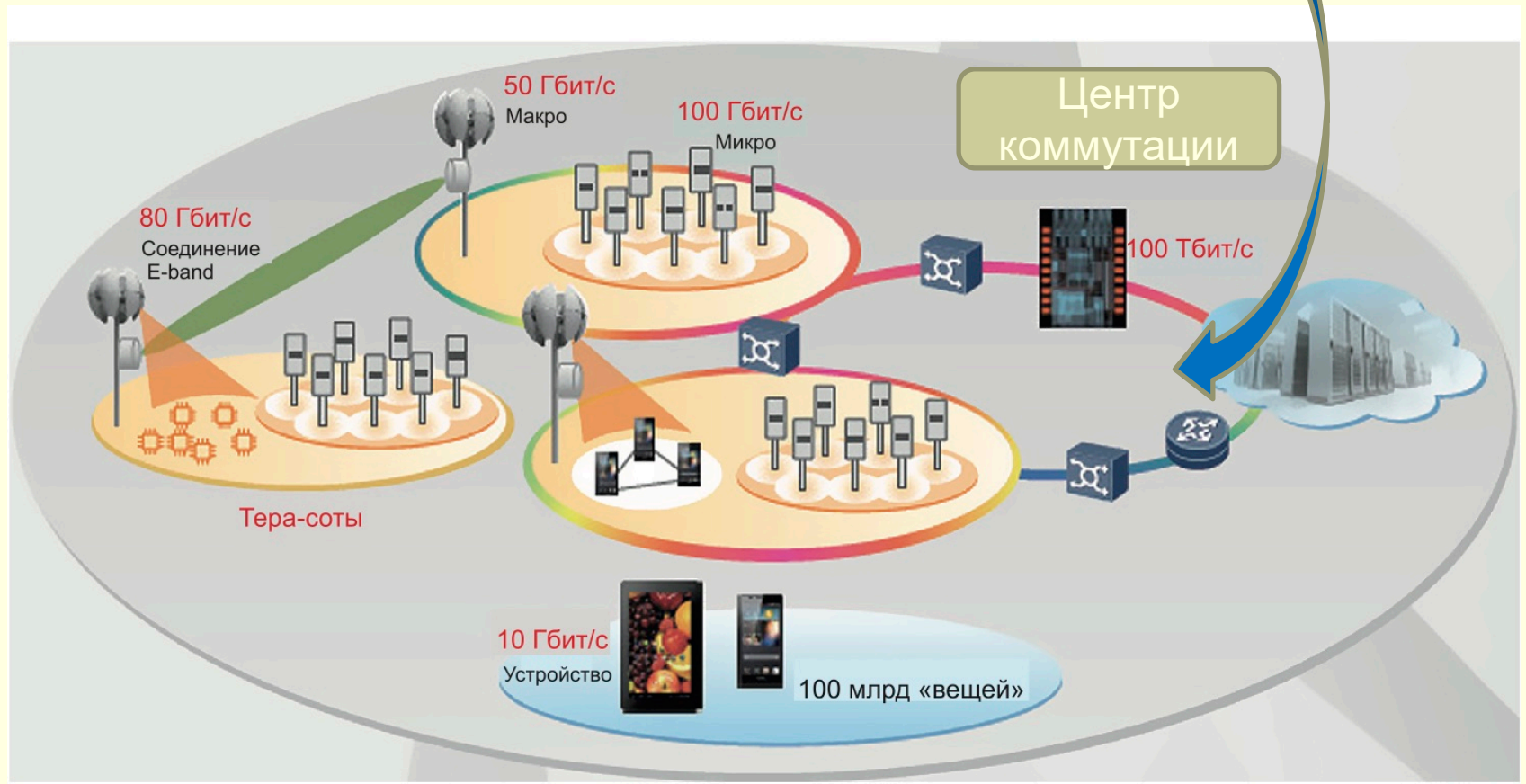


Схема построения сети 5G

Оптические сети



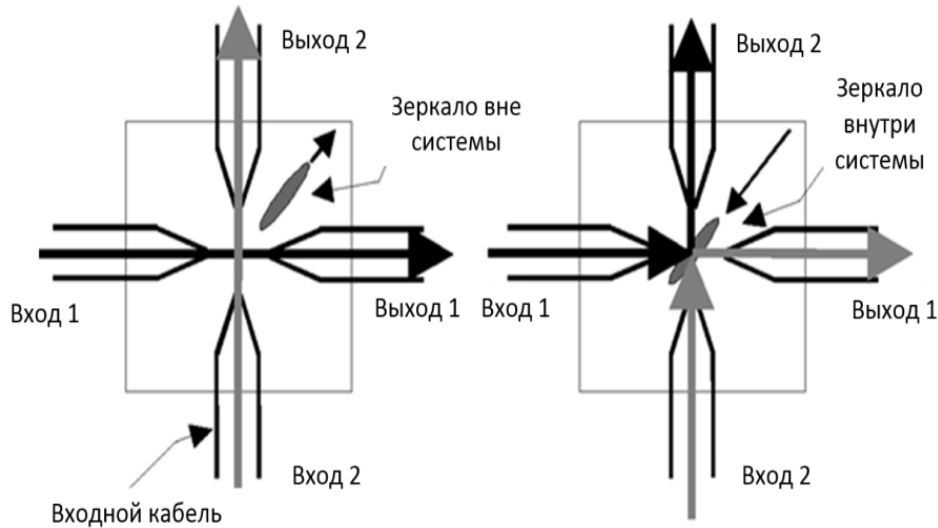
Полностью оптические или фотонные сети



Анализ современных технологий построения фотонных коммутаторов

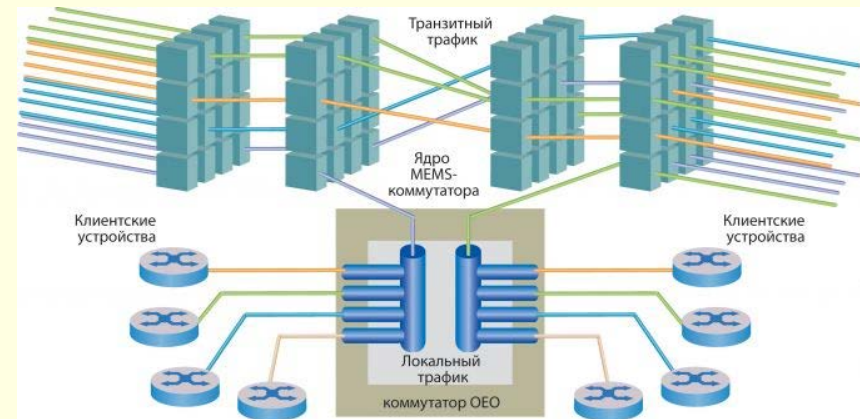
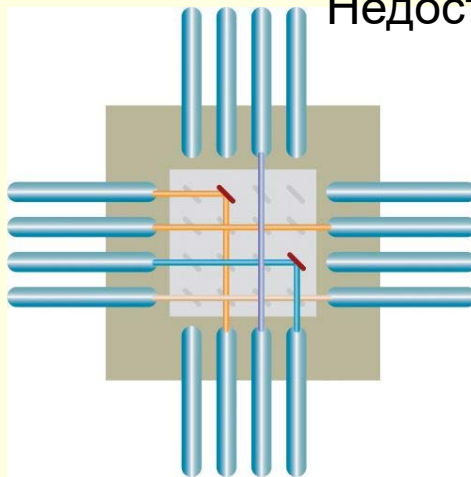
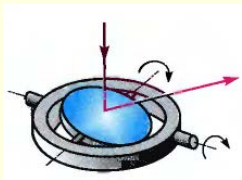
Технологии построения	Время переключения
механические оптические коммутаторы	10 - 500 мс
электрооптические коммутаторы	10–100 пс
термооптические коммутаторы	2 мс
акустооптические коммутаторы	500 нс-10 мкс
коммутаторы на фотонных кристаллах	1 нс-10 пс
коммутаторы на многослойных световодных жидкокристаллических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

Механические фотонные коммутаторы

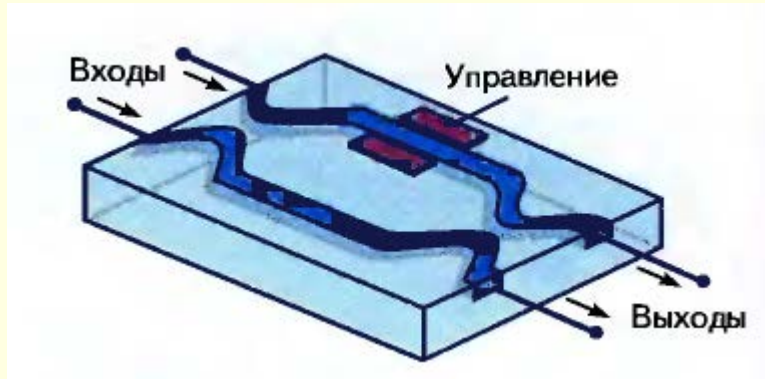


Микроэлектронные механические системы MEMS (Micro-Electro Mechanical System).

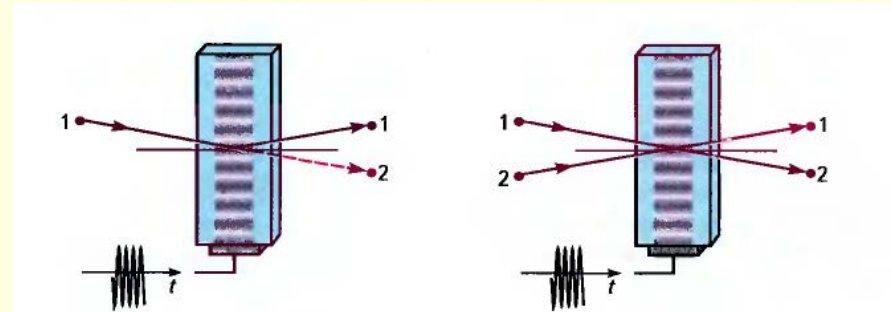
Недостаток – низкое быстродействие



Термооптические и акустооптические фотонные коммутаторы



Термооптический коммутатор



Акустооптический коммутатор

**Недостаток-низкое
быстродействие**

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ В ОБЛАСТИ ФОТОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

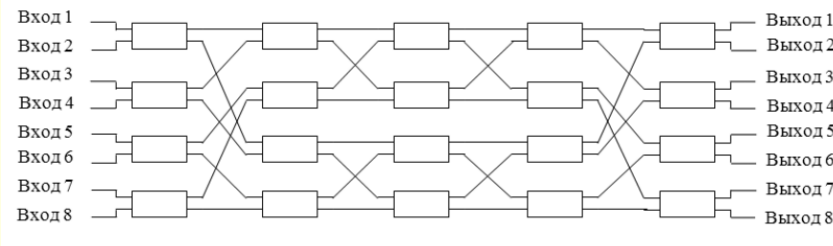
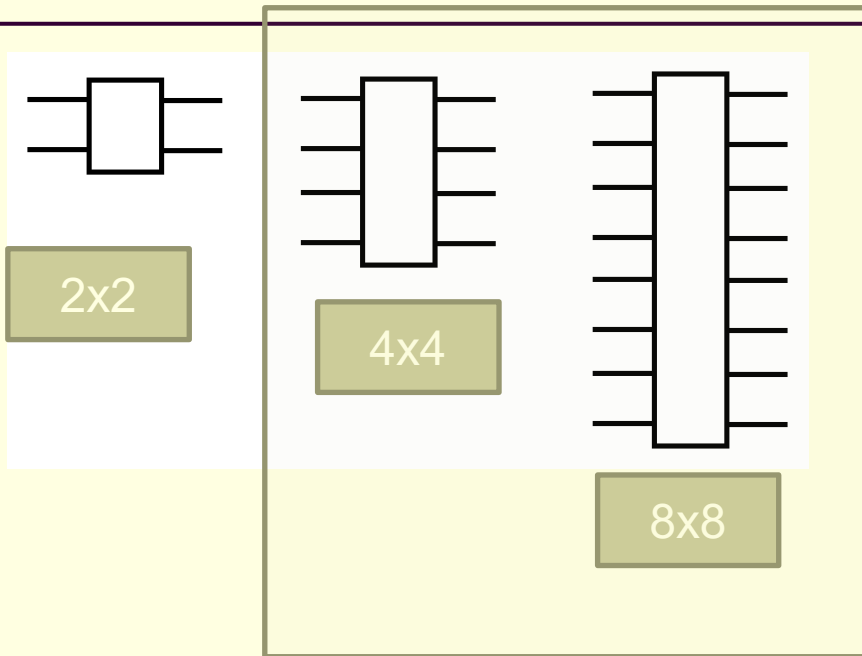
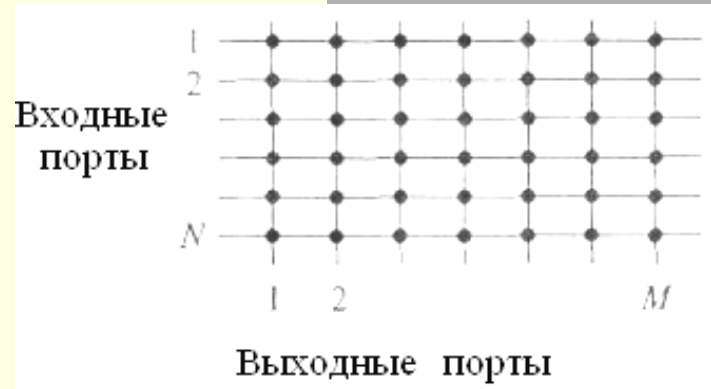


Схема Бенеша



Матричный коммутатор

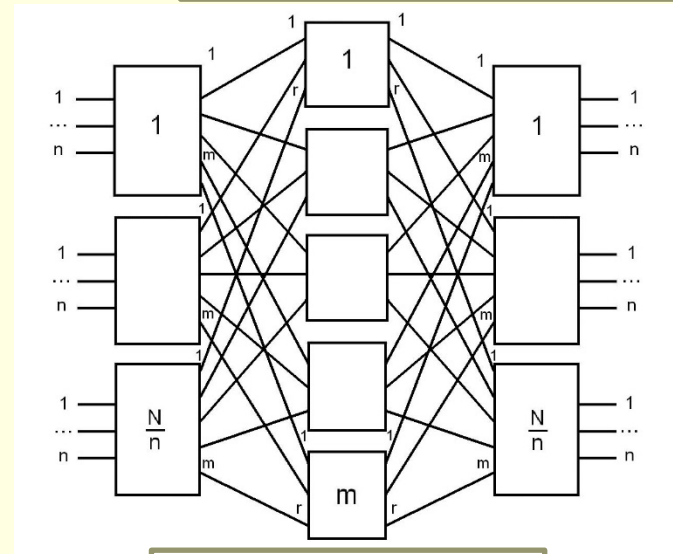


Схема Клоза

Принципы управления фотонными коммутаторами



БАЗОВЫЙ ФОТОННЫЙ КОММУТАТОР 4×4

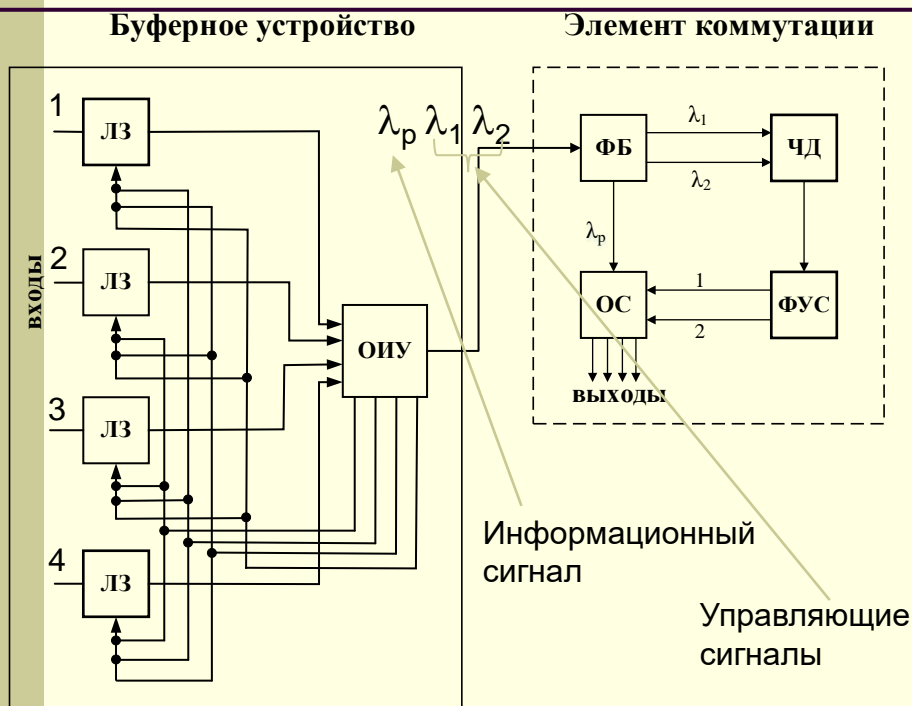


Схема фотонного коммутатора 4×4

ЛЗ-линия задержки

ОИУ-оптическое интегральное устройство

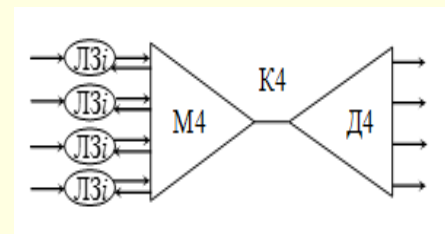
ФБ-фильтр Брэгга; ЧД-частотный детектор

ФУС-формирователь управляющего сигнала

ОС-отклоняющая система

Таблица - Комбинации управляющих сигналов

Номер выхода	Управляющие сигналы
1	0 0
2	0 λ_2
3	λ_1 0
4	$\lambda_1 \lambda_2$



Эквивалентная схема коммутатора 4×4

Схема оптического коммутатора 16×16

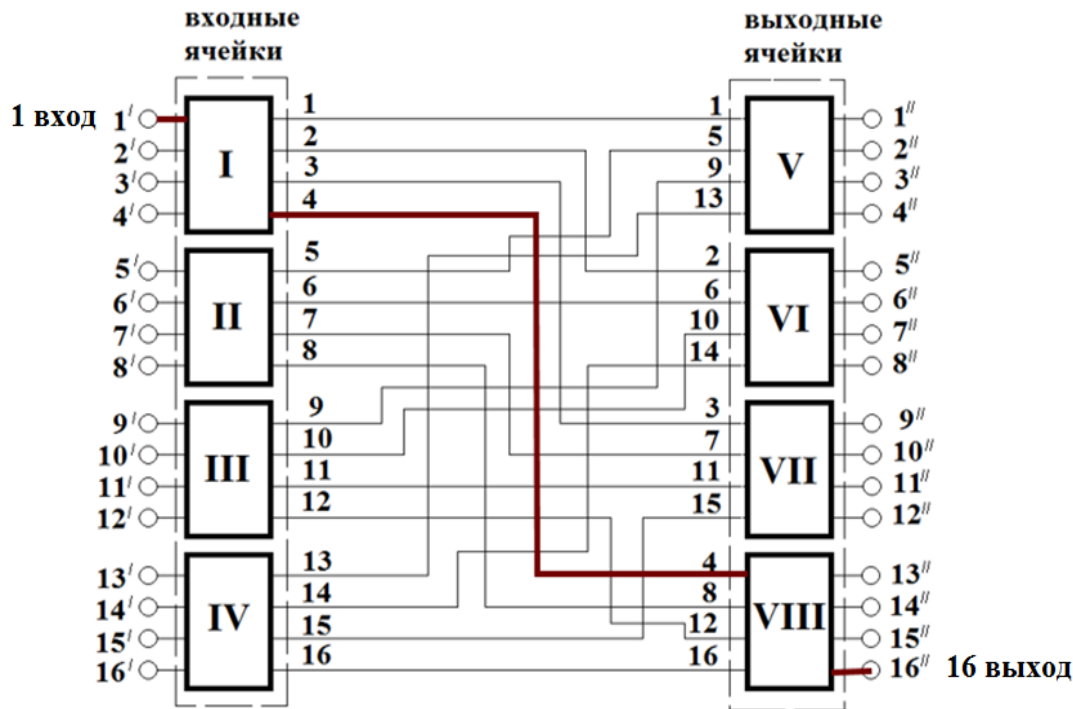


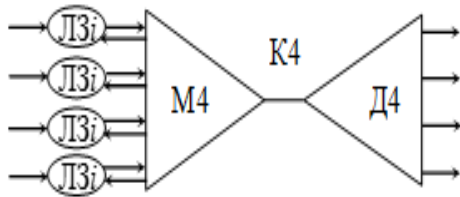
Схема оптического коммутатора 16x16

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 λ_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	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$

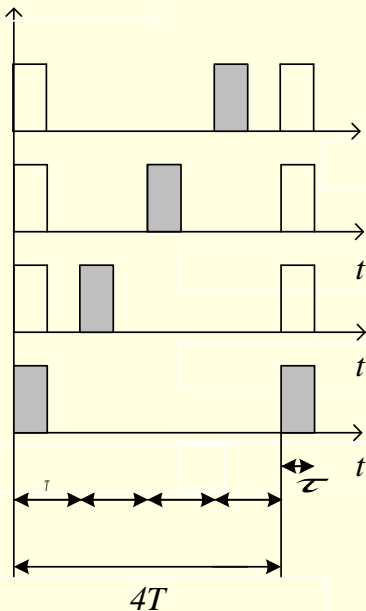
Оценка периода сигналов для обеспечения неблокируемости коммутационной системы

Базовый элемент К4

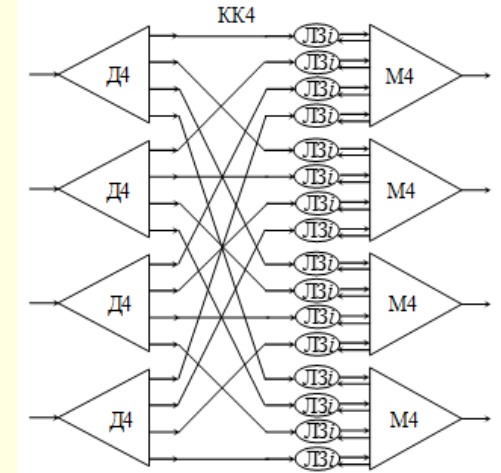


$T_1 = 4T$ - период разнесения сигналов в коммутаторе 4x4

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



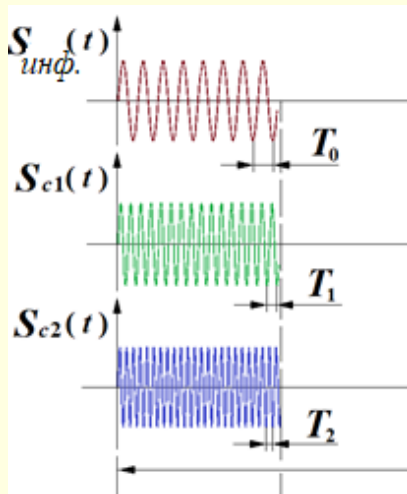
Базовый элемент КК4



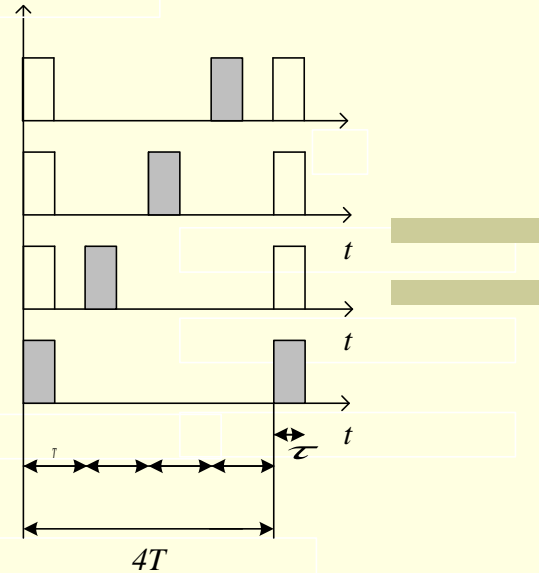
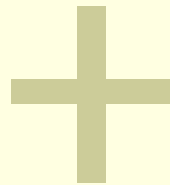
$$T_1 = 4T$$

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

Дуальный принцип



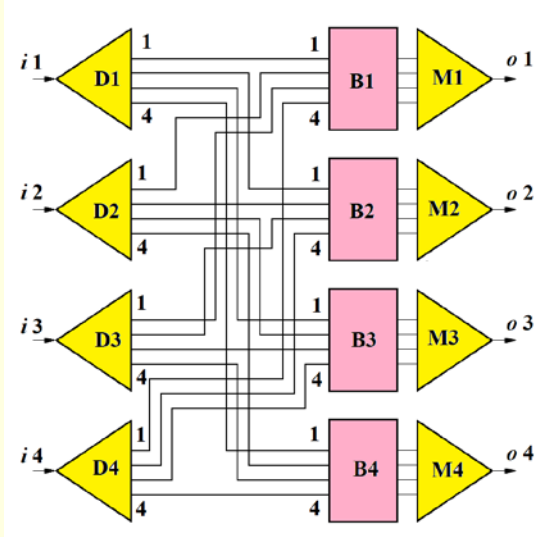
Разделение
по частоте



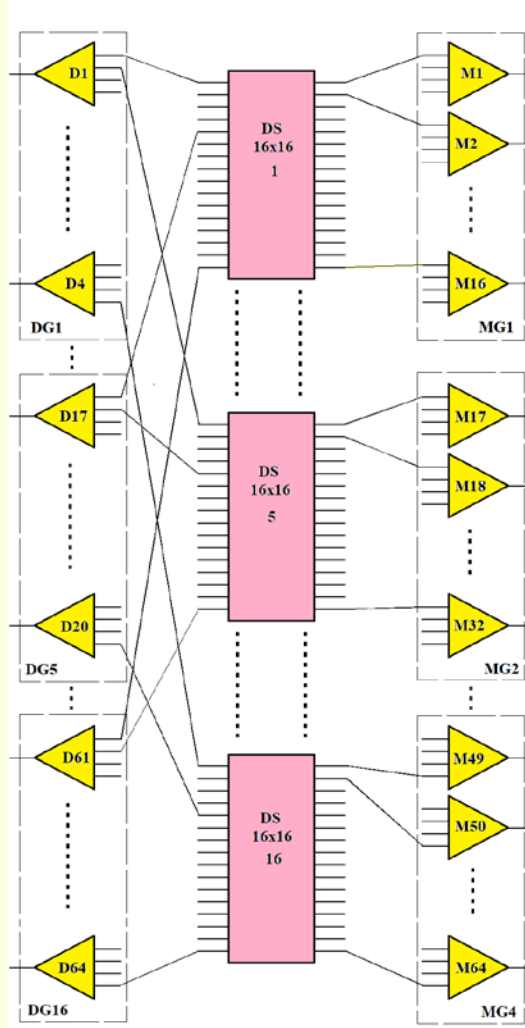
Разделение
по времени

Дуальный
принцип

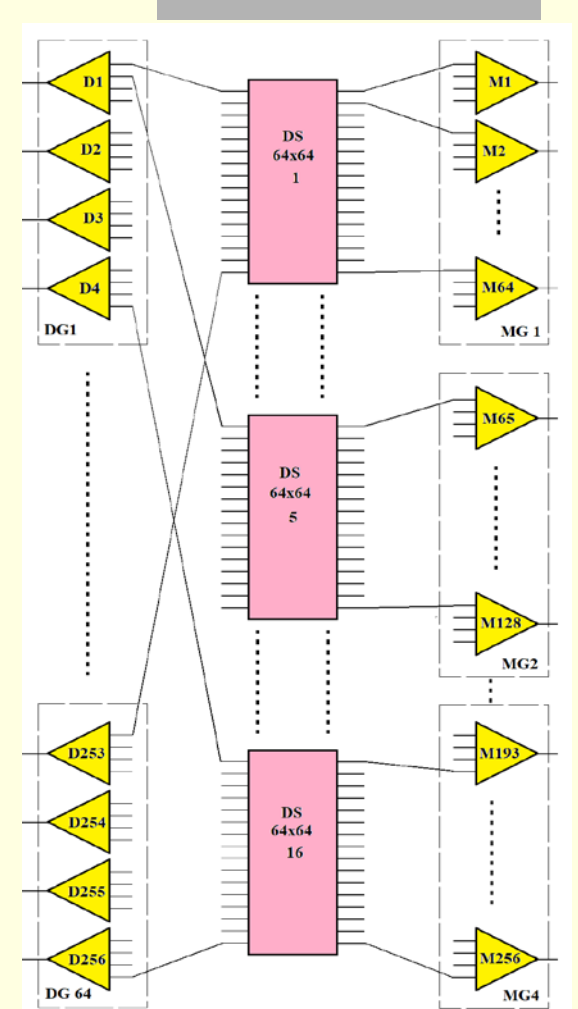
Дуальные коммутаторы



4x4



64x64

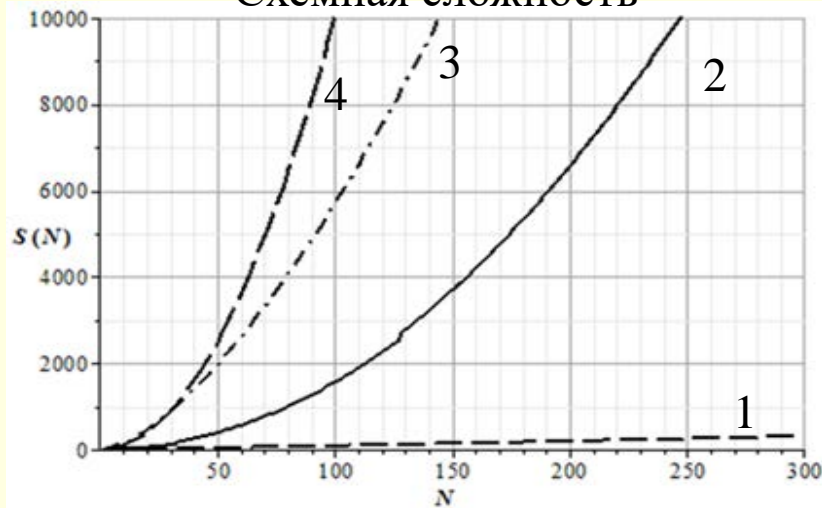


256x256

$$T_p = 4T = const$$

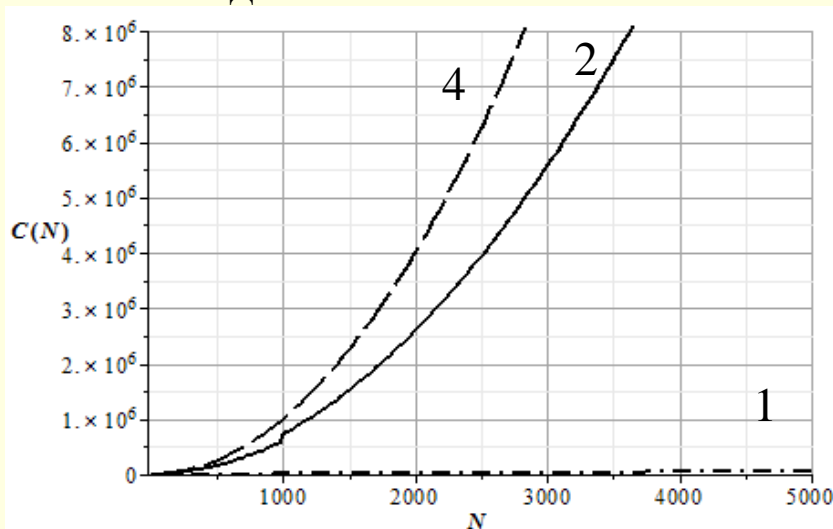
Схемная и соединительная сложность S

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

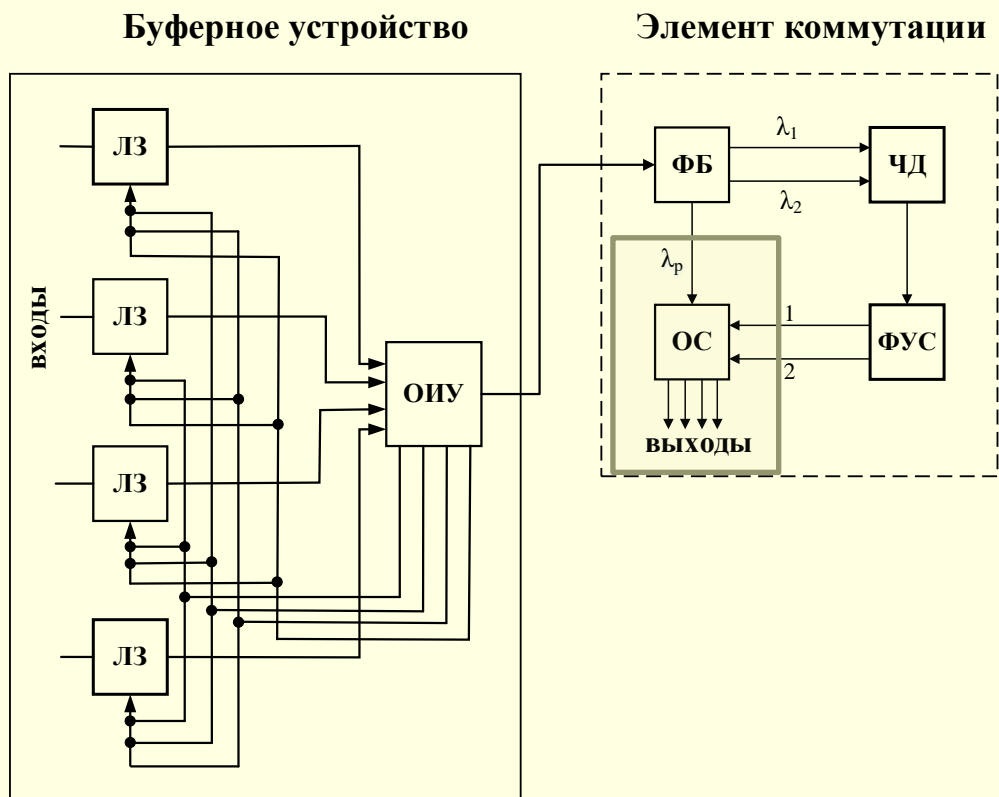


Схема фотонного коммутатора 4×4

ЛЗ-линия задержки

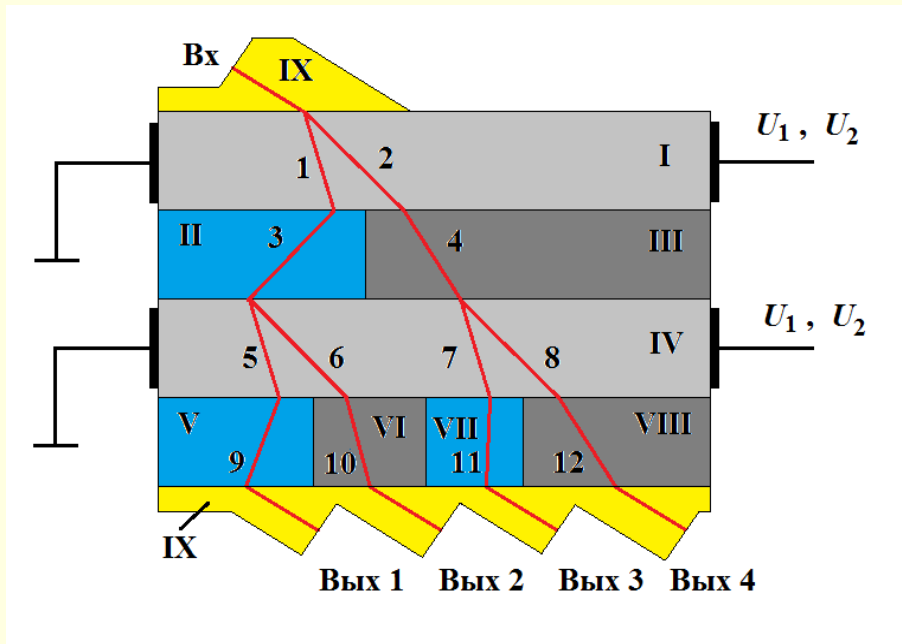
ОИУ-оптическое интегральное устройство

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}_Σ - результирующая матрица преобразования.

Расчет коэффициентов отражения и прохождения

1 Построение матриц отражения и прохождения для анизотропной структуры

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

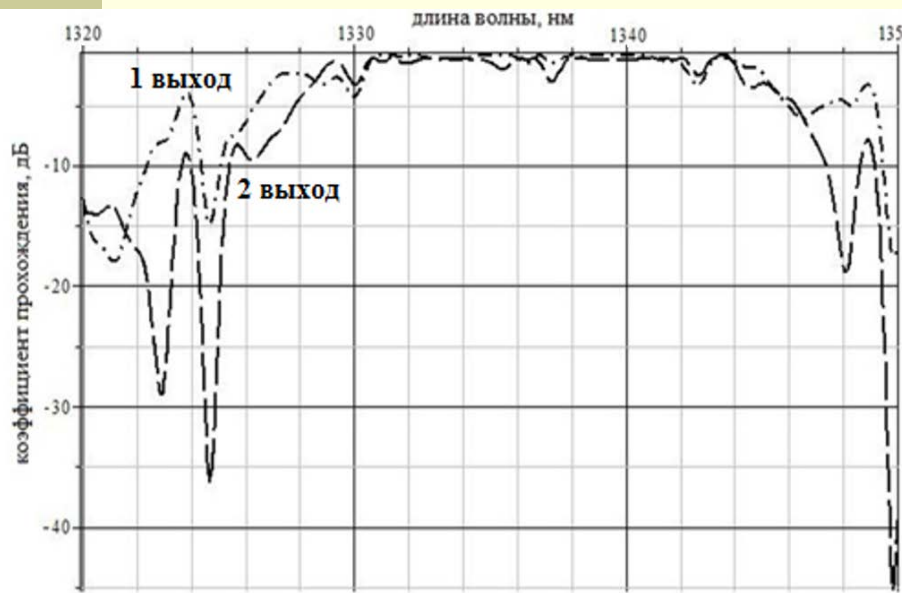
$$\begin{pmatrix} H_{\text{отр } TE} \\ H_{\text{отр } TM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} H_{\text{пад } TE} \\ H_{\text{пад } TM} \end{pmatrix}$$

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

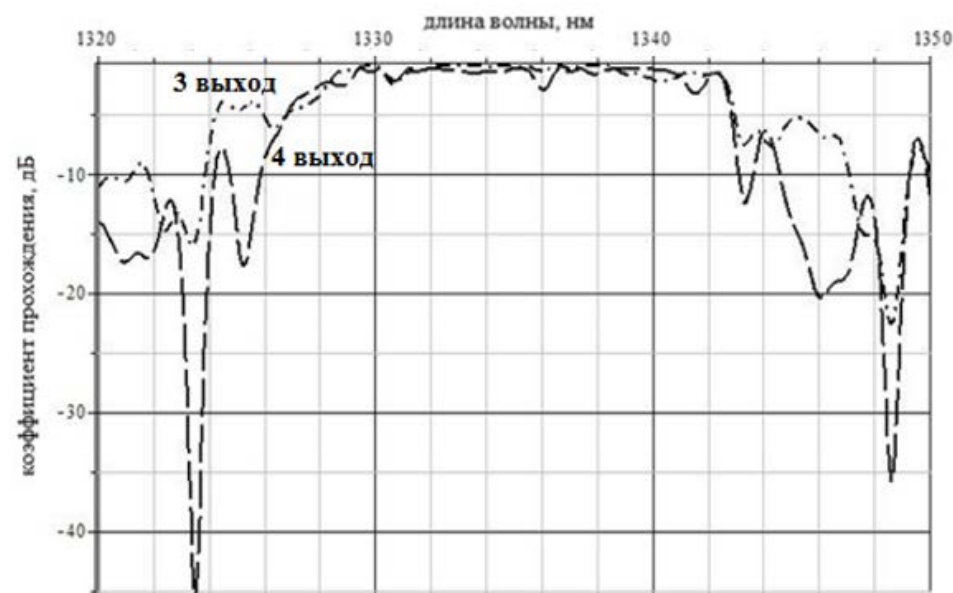
$$R_{TE}^+ = \frac{H_{\text{отр}}^+}{H_{\text{пад } TE}} = \frac{jR_{11} + R_{21}}{2}$$

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

Коэффициенты прохождения информационного сигнала через отклоняющую систему

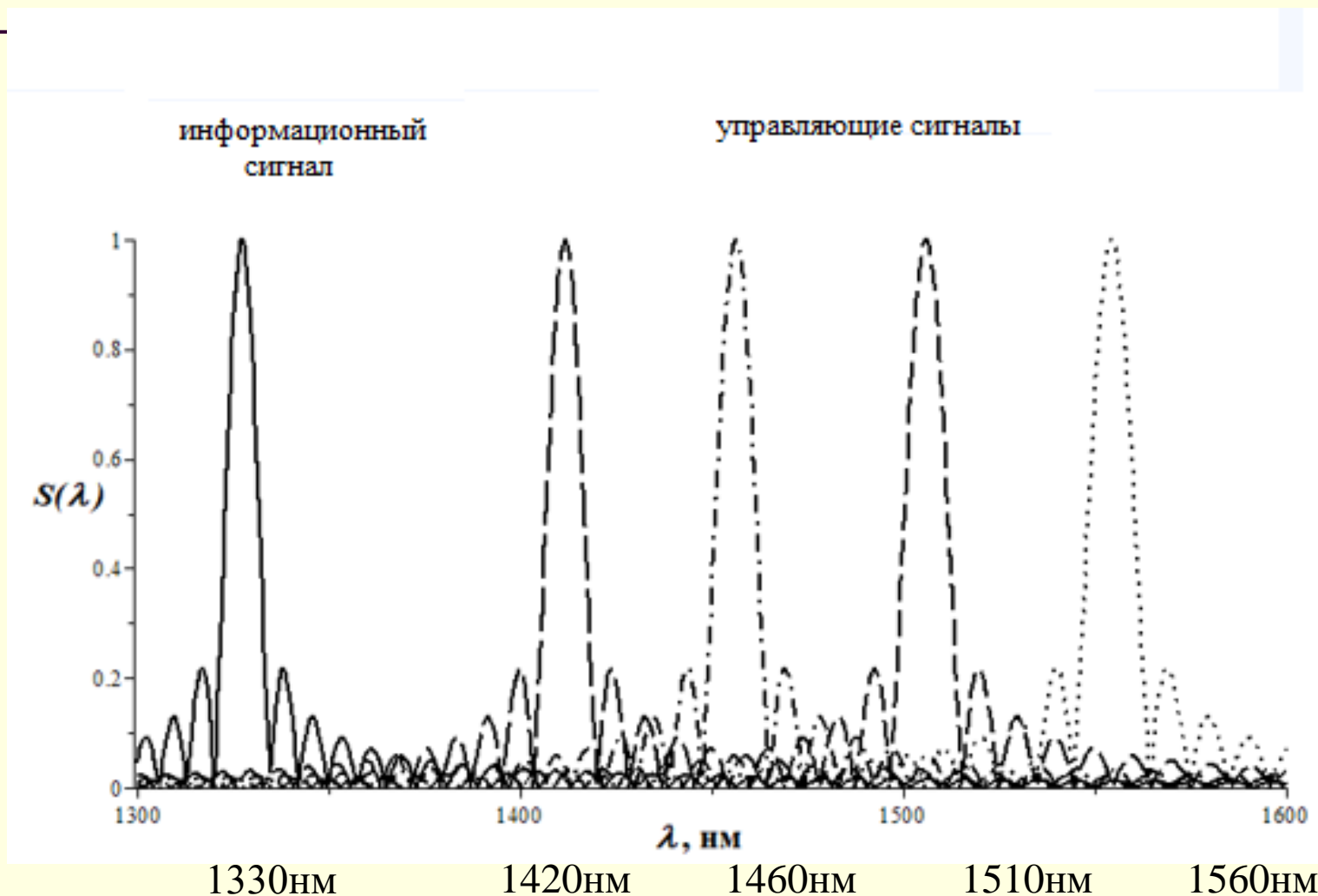


Зависимость коэффициентов
прохождения оптического луча для 1
и 2 выходов отклоняющей системы



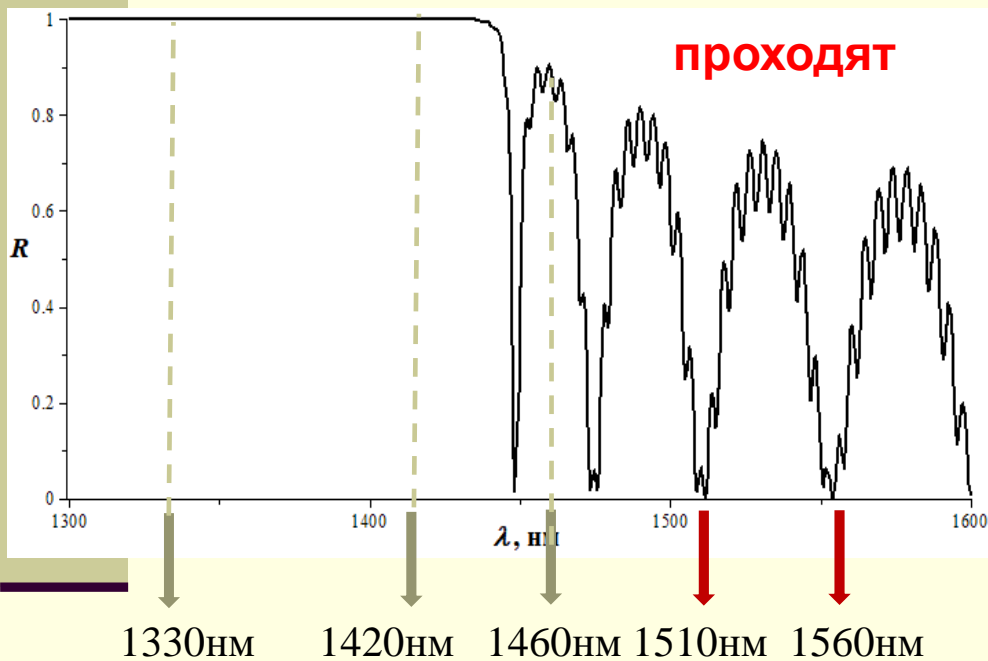
Коэффициенты прохождения оптического
луча для 3 и 4 выходов отклоняющей
системы

АЧХ сигналов в дуальной фотонной коммутационной системе 16×16



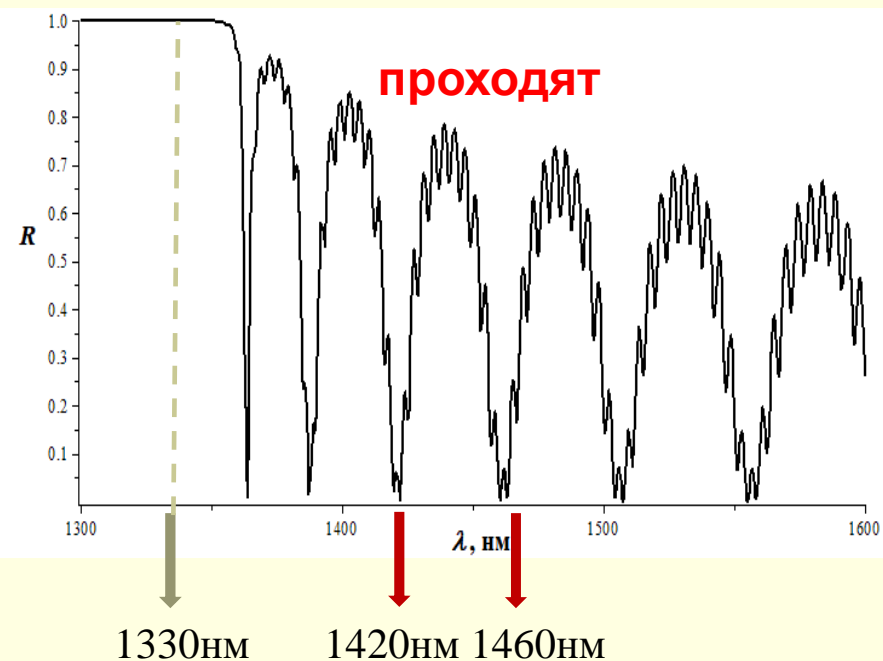
АЧХ фильтров Брэгга в фотонной коммутационной ячейке с децентрализованным управлением

отражаются



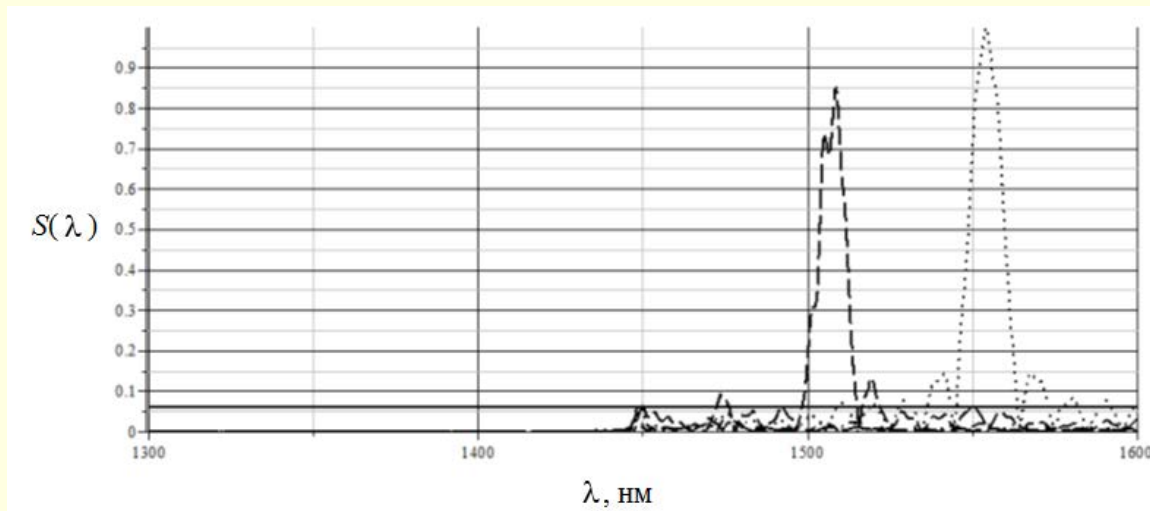
АЧХ фильтра Брэгга первого каскада

отражается

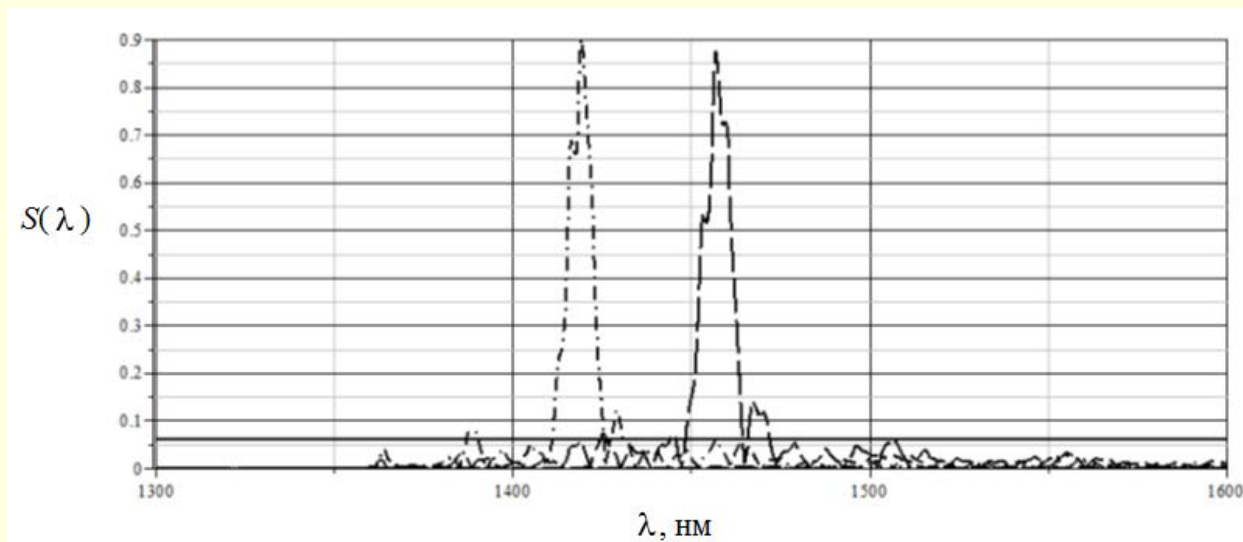


АЧХ фильтра Брэгга второго каскада

Спектры прошедших управляющих сигналов

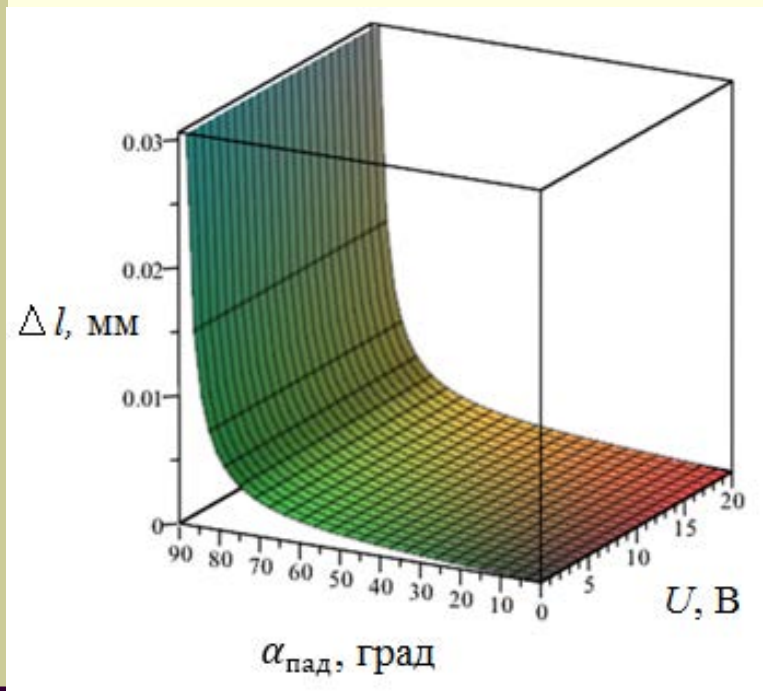


на выходе фильтра
Брэгга 1 каскада



на выходе фильтра
Брэгга 2 каскада

Пространственное отклонение луча



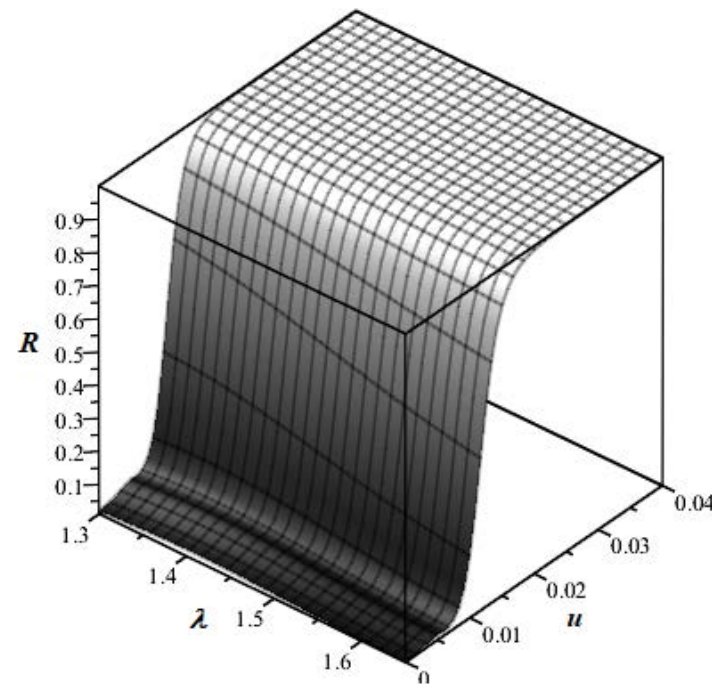
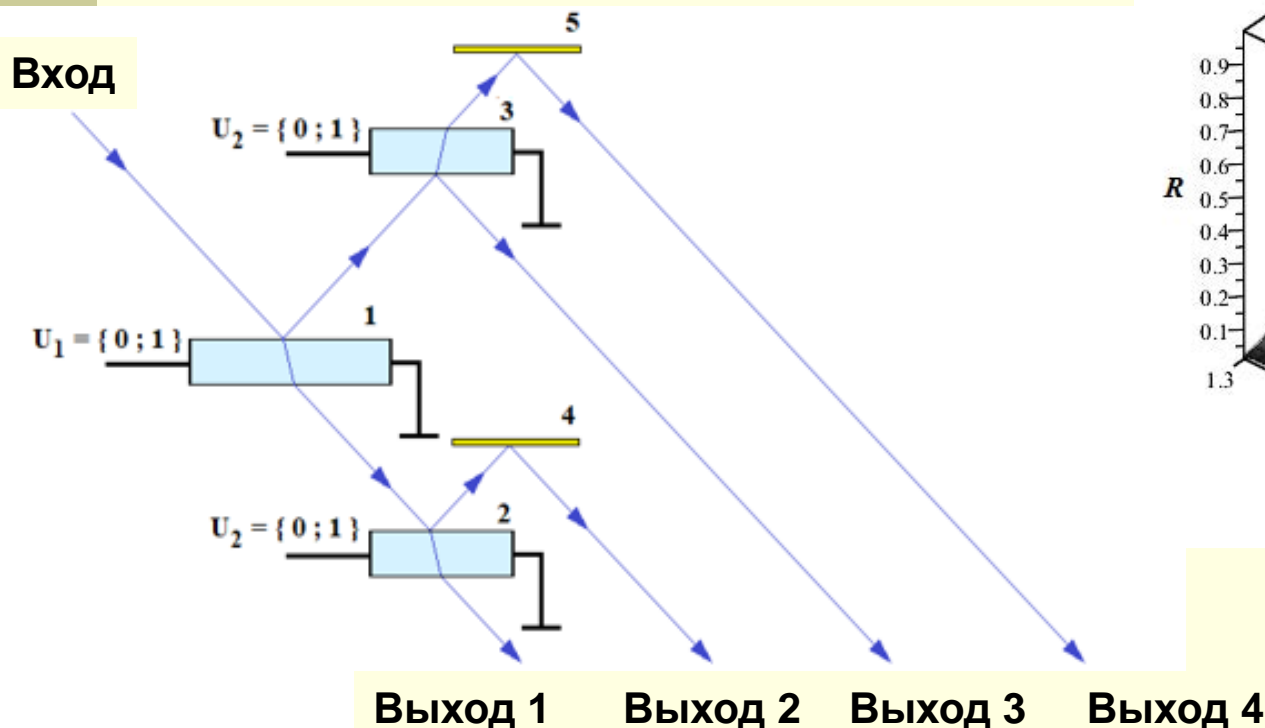
Зависимость пространственного отклонения от напряжения и угла падения при толщине слоя 1 мм для ниобата лития

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

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

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, 2021₂₆ 012068.

Методика расчета быстродействия фотонных коммутационных систем

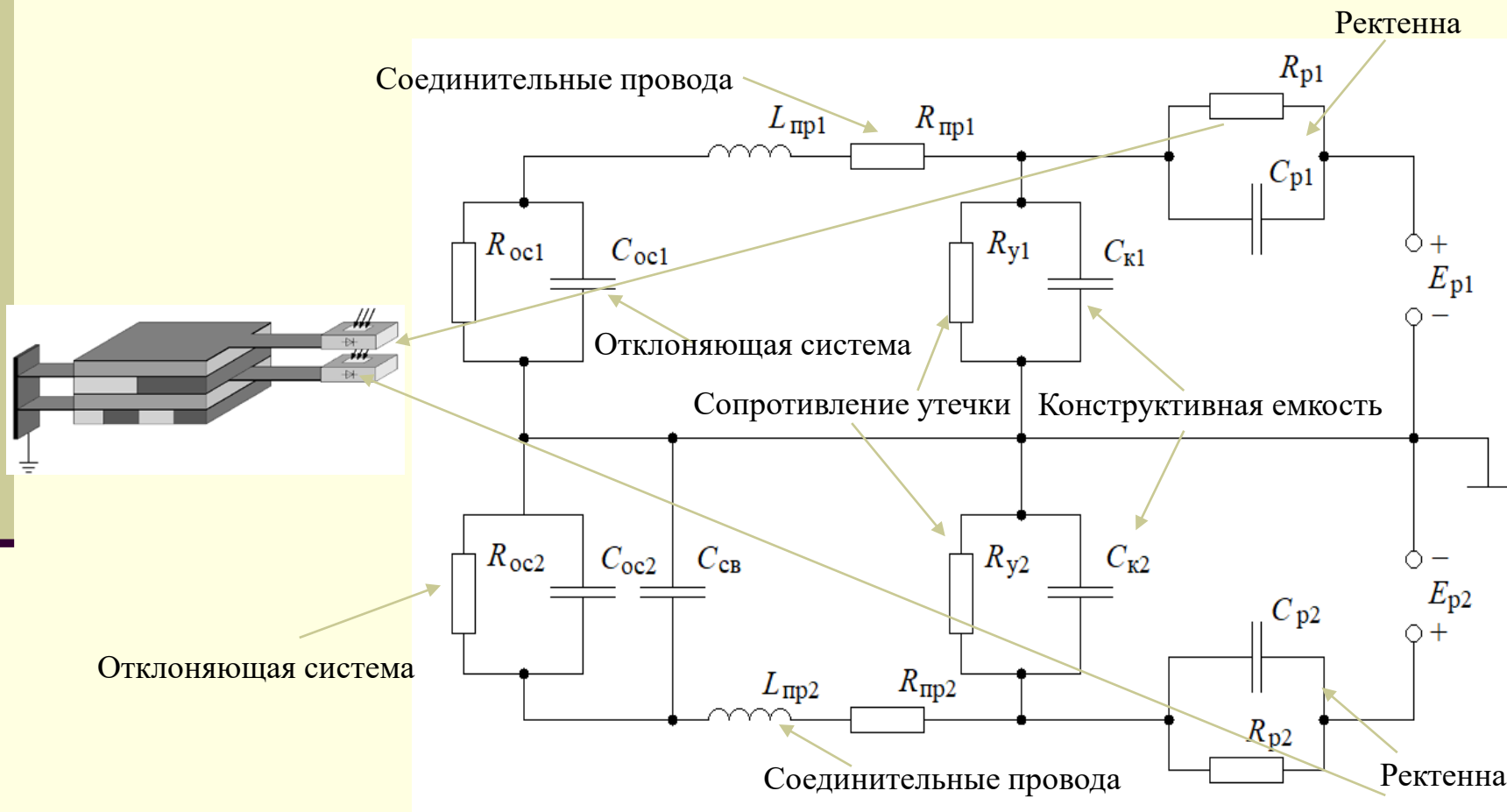
Время задержки определяется следующими факторами:

- 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:

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

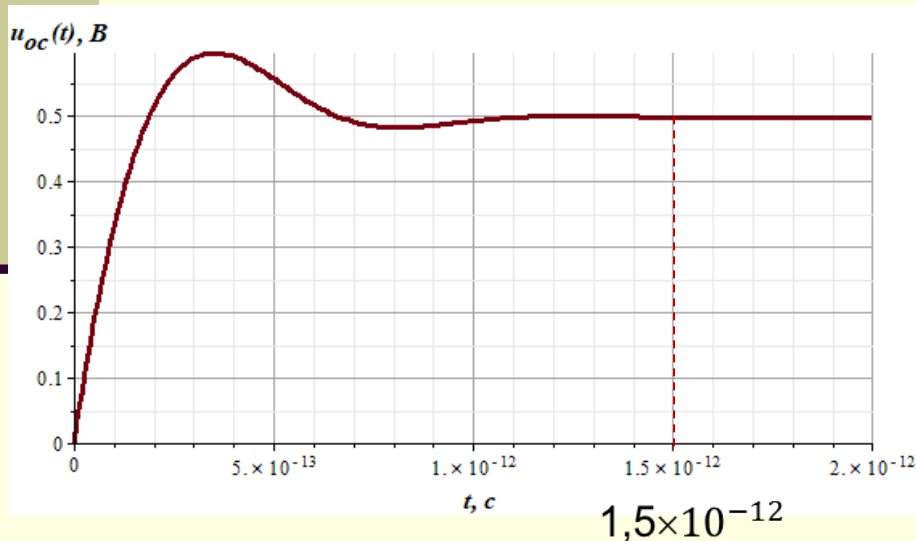
1. Время переходных процессов в цепях управляющих электрических сигналов

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

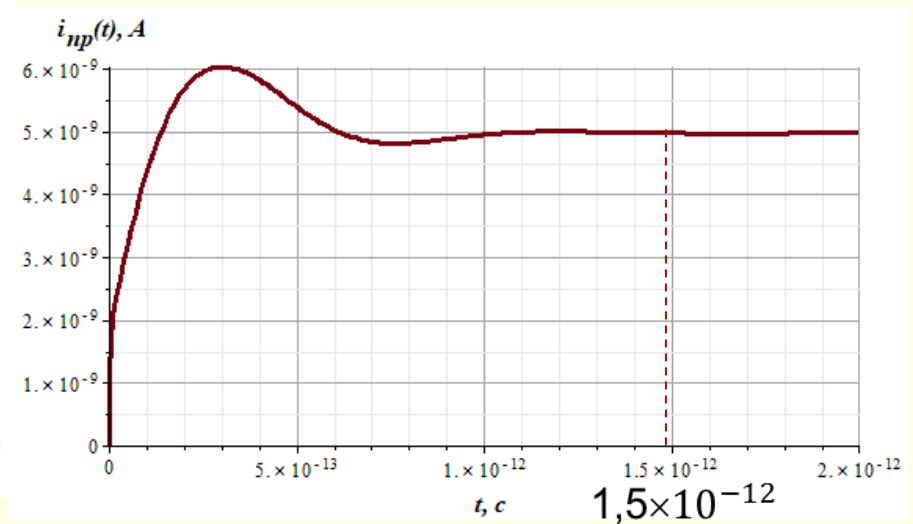
- напряжение на отклоняющей системе

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

- 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;

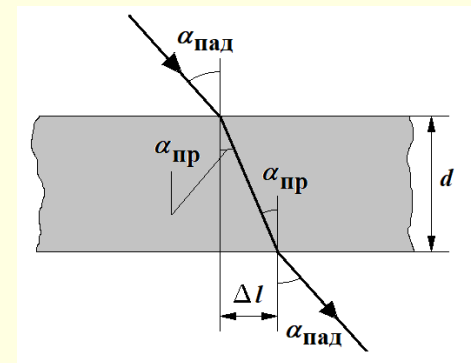
$\alpha_{\text{пад}}$ - угол падения на пластину;

d - толщина пластины;

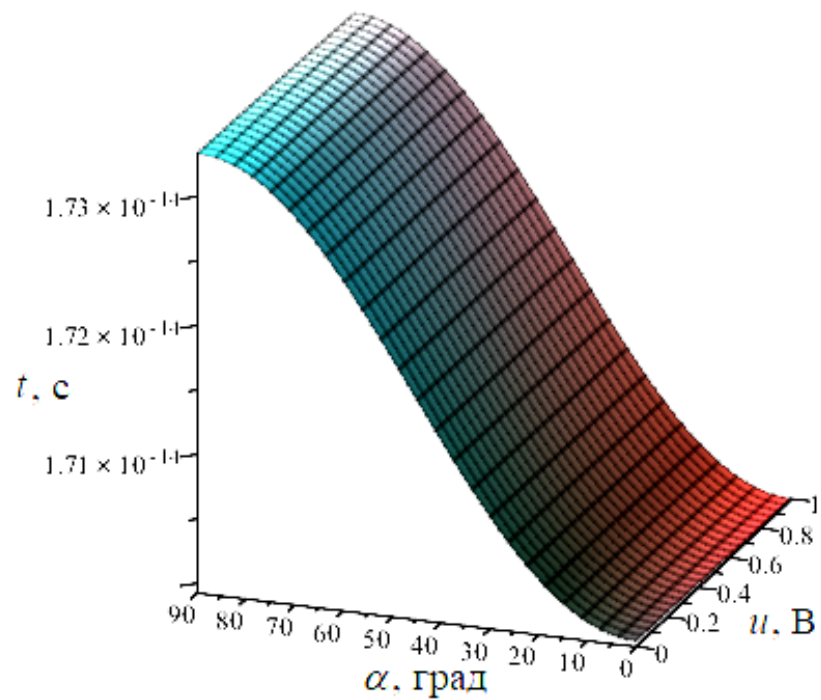
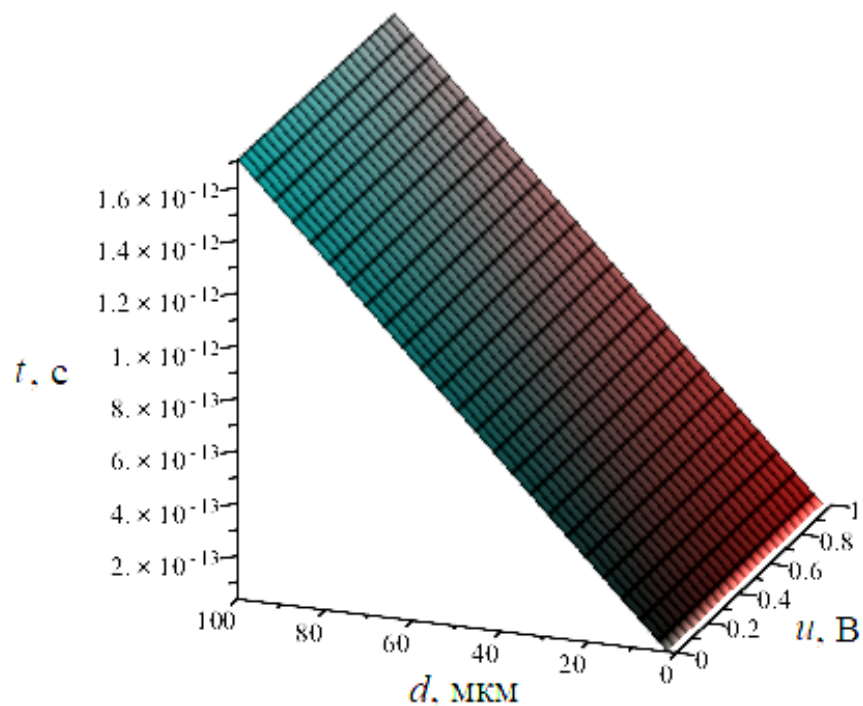
U - приложенное напряжение;

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

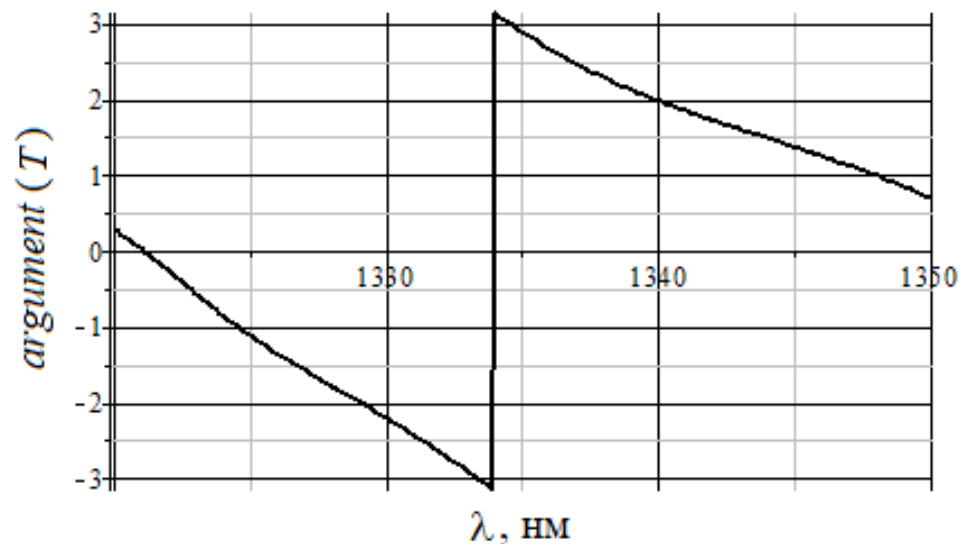
б) от напряжения и угла падения

($d=1$ мкм)

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

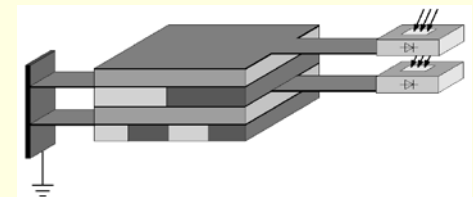
3. Расчет задержки сигнала на границах раздела сред и других неоднородностях

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



Фазо-частотная характеристика
четырёхслойной 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

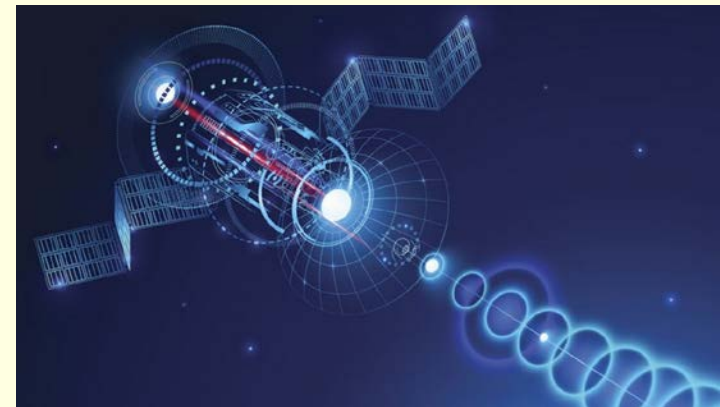
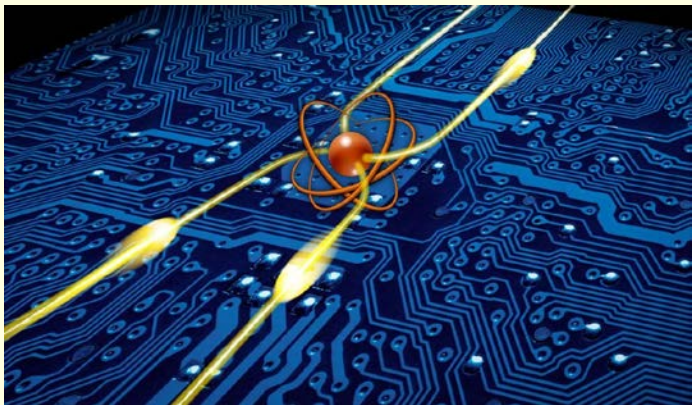
Задержка сигнала в отклоняющей системе составила:

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

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