



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Разработки по фотонике в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Алексей Борисович Устинов

**Руководитель лаборатории радиофотоники,
профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ**

24-25 июня 2025

e-mail: ustinov-rus@mail.ru

Почему интересна фотоника и радиофотоника ?

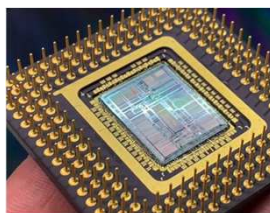
Радиофотоника – междисциплинарное направление, которое объединяет преимущества фотоники с микроэлектроникой и техникой СВЧ.

Задачи: генерация, передача и **обработка** данных оптическими методами

Преимущества при обработке данных

Возможности **микроэлектроники**

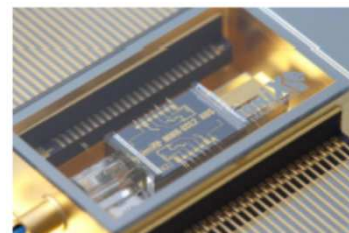
Банк фильтров –
маршрутизатор



Тактовая частота – единицы ГГц

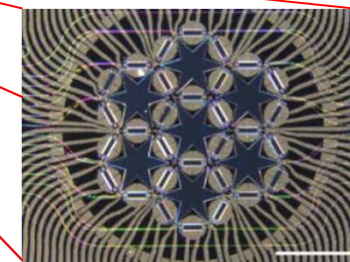
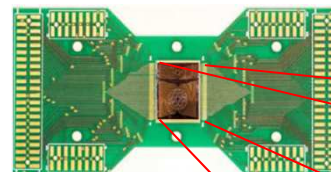
Возможности **фотоники**

Фотонные интегральные схемы



Уменьшение
размеров,
увеличение
быстродействия

Оптические сигнальные процессоры

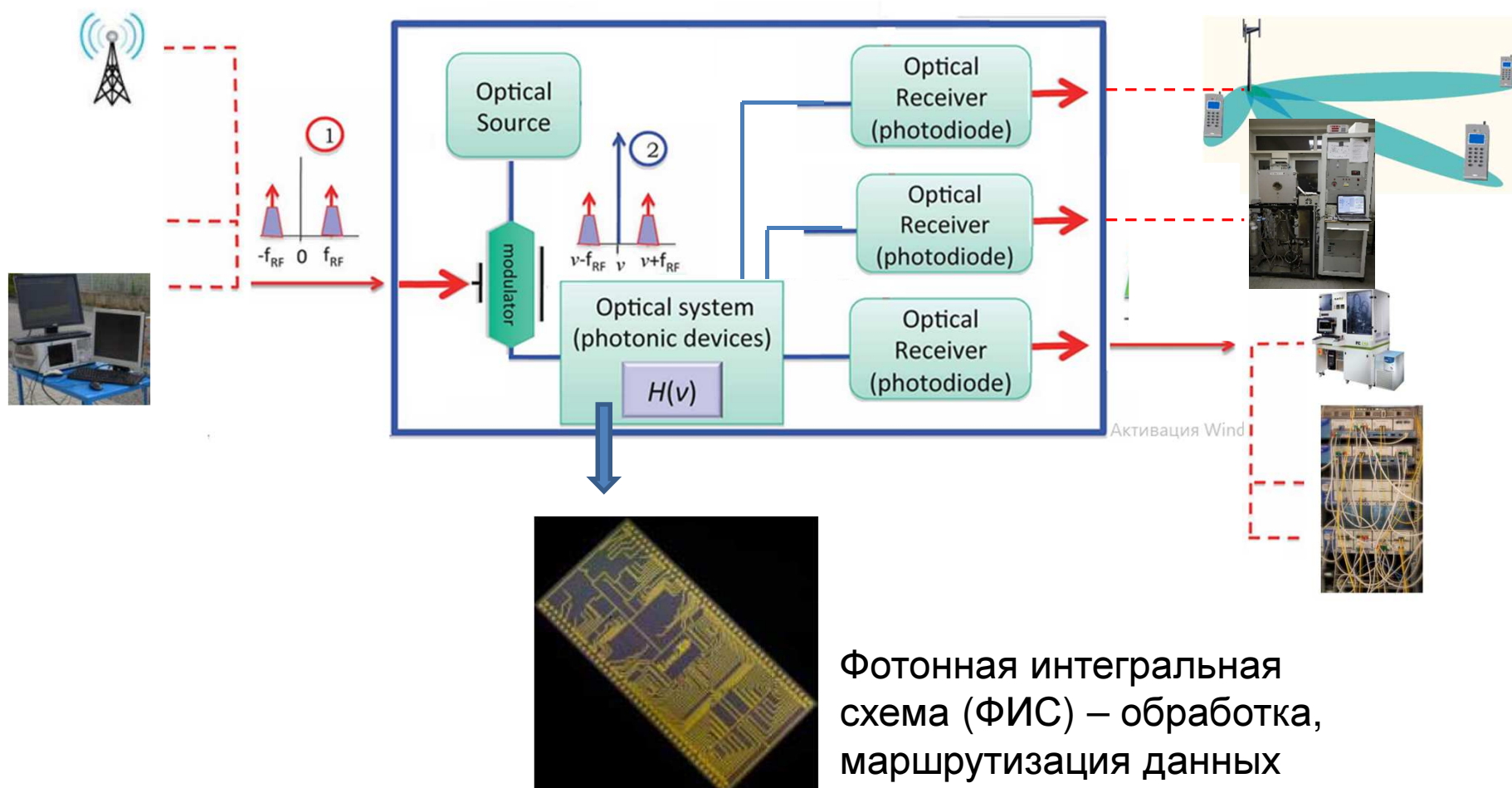


Тактовая частота – сотни ГГц
(в 100 раз выше)

Фотоника и радиофотоника для передачи и обработки данных

3

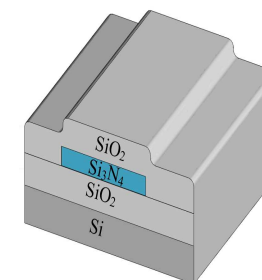
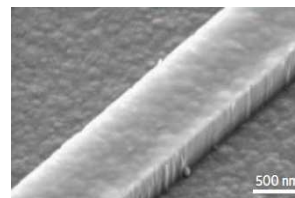
----- электрический сигнал (f_{RF}) — Оптический сигнал (ν)



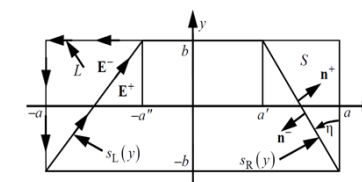
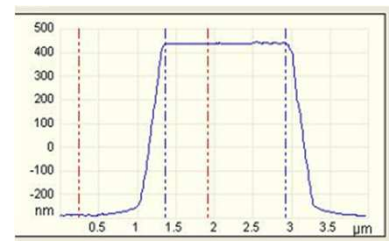
Разработка пассивных компонентов ФИС: аналитические модели, характеристика

4

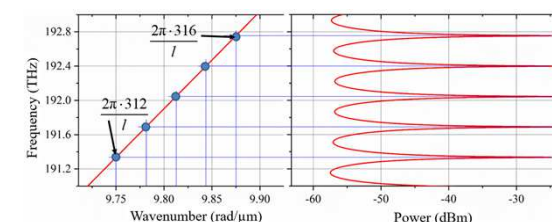
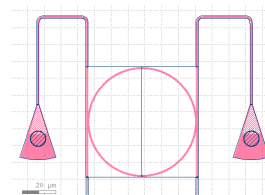
➤ Освоены аналитические методы расчета спектров электромагнитных волн в оптических интегральных волноводах прямоугольного сечения (Методы Маркатили и Гоэля)



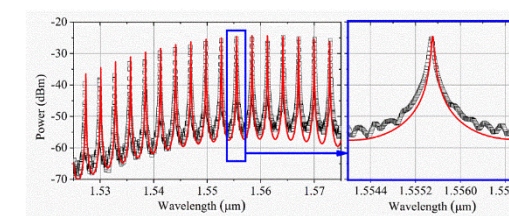
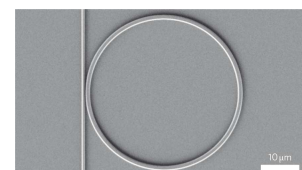
➤ Впервые разработана теория спектров электромагнитных волн в оптических интегральных волноводах трапецеидального сечения



➤ Разработан метод неразрушающего контроля параметров волноводов оптических интегральных схем



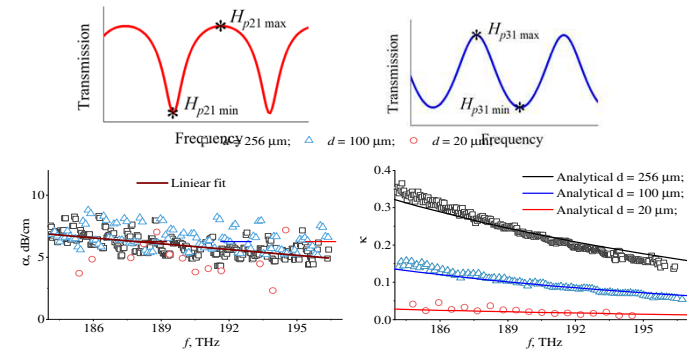
➤ Разработана оригинальная модель кольцевых микрорезонаторов, позволяющая рассчитывать их рабочие характеристики



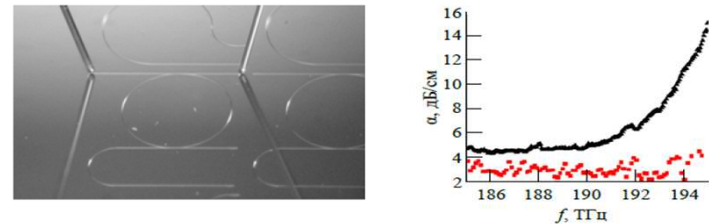
Разработка пассивных компонентов ФИС: технология, измерения, моделирование

5

➤ Метод определения частотных зависимостей коэффициентов затухания и связи оптического микрокольцевого резонатора с прямым волноводом



➤ Характеризация технологии изготовления оптических волноводов и элементов ФИС на их основе

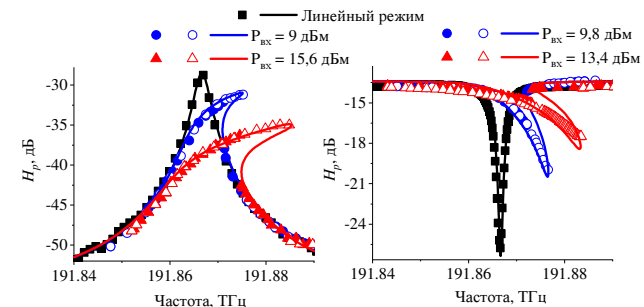


➤ Освоены методы расчета базовых элементов кремниевых ФИС: волноводов, ответвителей и др. Освоены методы расчета микрокольцевых резонаторов на базовых элементах.

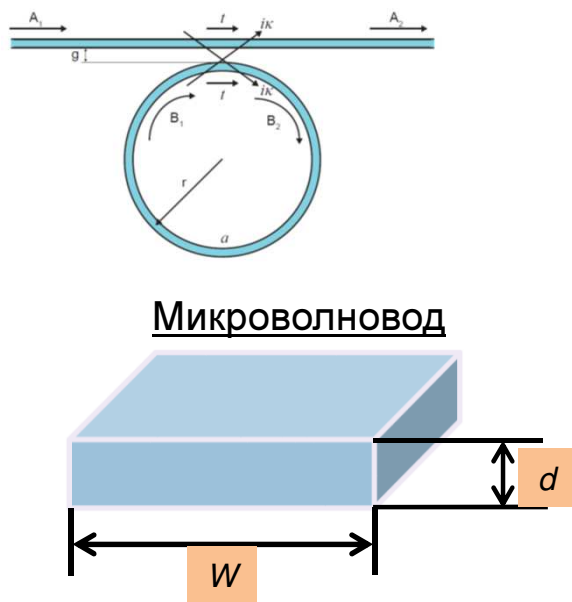


➤ Освоены методы расчета бистабильных передаточных характеристик при конкуренции тепловой и зарядовой нелинейности.

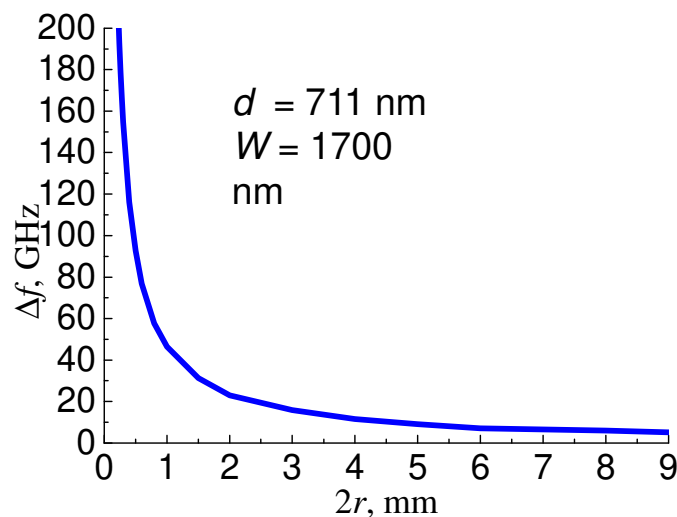
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ



Работы по интегральной фотонике: микрорезонатор



Генерируемые частоты

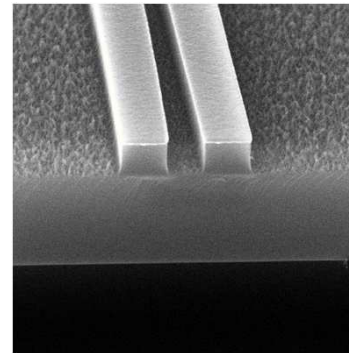
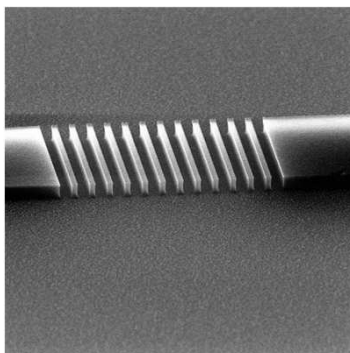
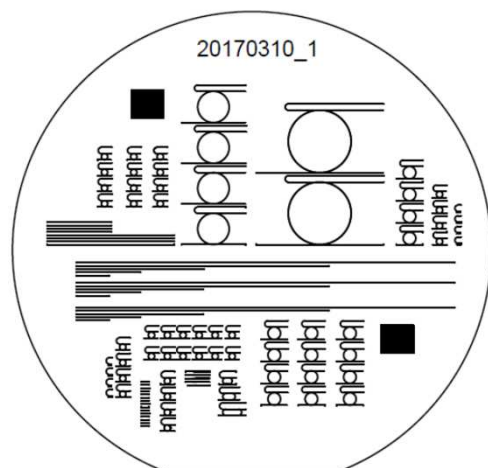


✓ Работа находится на стадии предпроектной подготовки

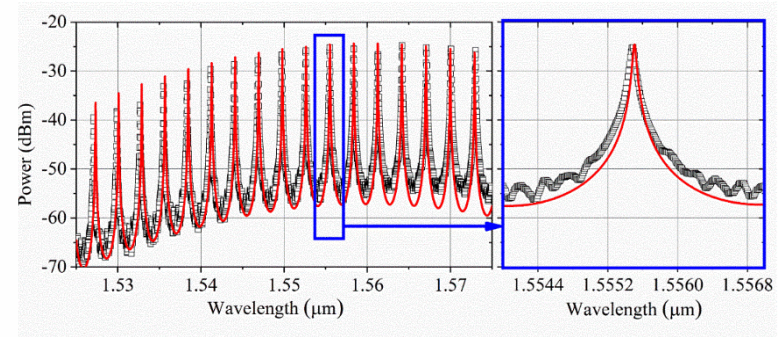
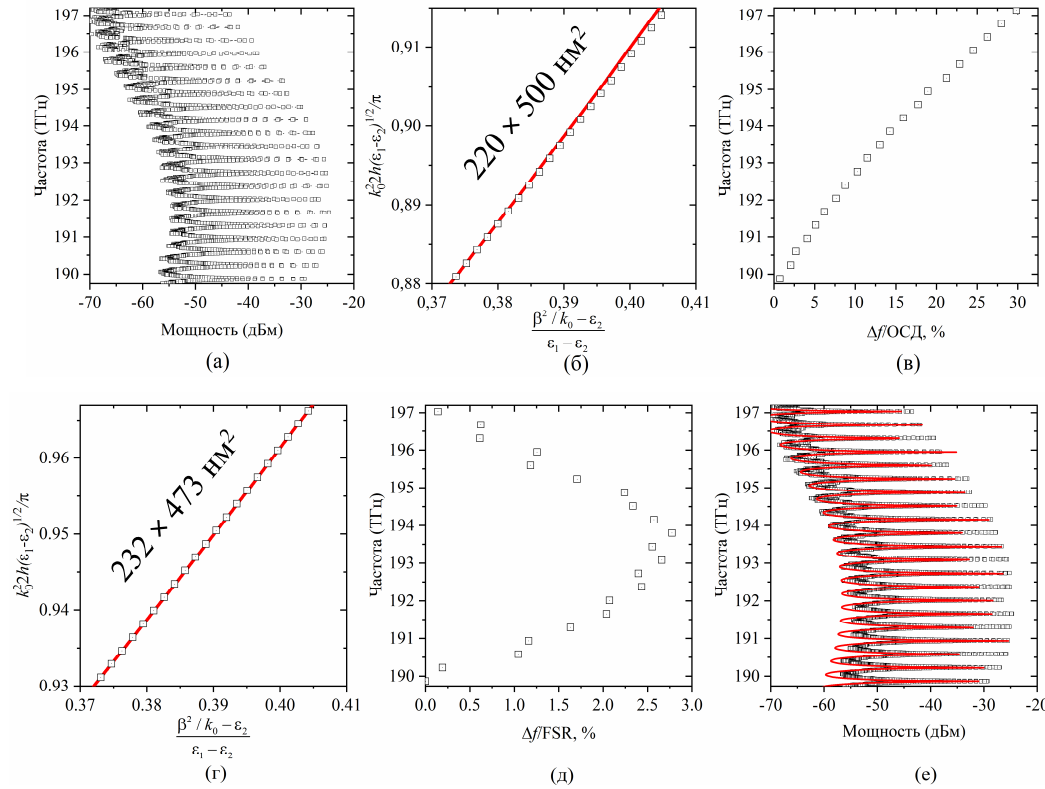
✓ Работа реализуется совместно с ГК Элемент

✓ Результаты: теория, расчетные модели интегральных схем радиофотоники, технология изготовления

✓ Потребность в инвестициях 480 млн. руб.



Работы по описанию оптических свойств фотонных интегральных схем



$$T_{\text{MRR}}(\lambda) = 10 \log_{10} \left(\frac{\kappa^2 e^{al}}{e^{2al} - 2e^{al}(1 - \kappa) \cos(\beta(\lambda)l) + (1 - \kappa)^2} \right) + T_{\text{w, dBm}}(\lambda)$$

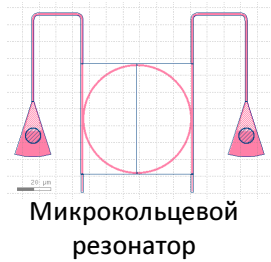
$$\text{ОСД} = 358 \text{ ГГц}$$

$$k_x w = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{n_1^2 \gamma_x}{n_2^2 k_x} \right)$$

$$k_y h = (q - 1) \frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\gamma_y}{k_y} \right)$$

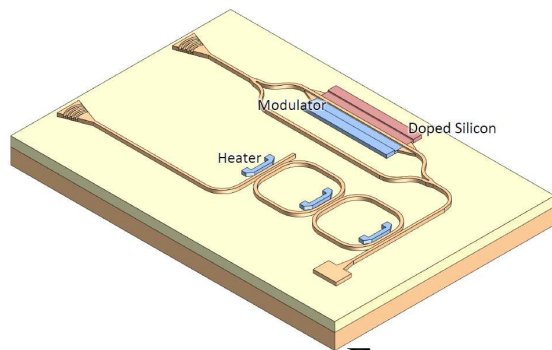
$$\beta(\omega) = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - (k_x^2 + k_y^2)}$$

$$k_x, k_y, \gamma_x = \sqrt{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) - k_x^2}, \gamma_y = \sqrt{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) - k_y^2}$$

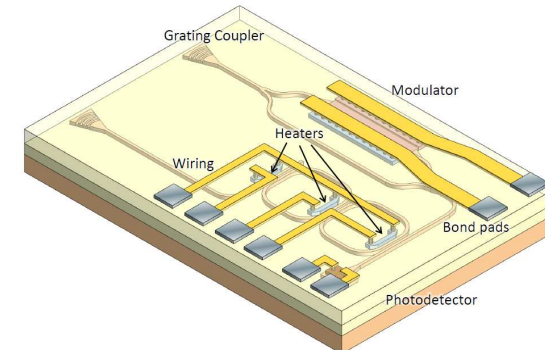


A.A. Ershov, A.I. Ereemeev, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov, "Extraction of the optical properties of waveguides through the characterization of silicon-on-insulator integrated circuits," *Microwave and Optical Technology Letters* 65, 2451 (2023).

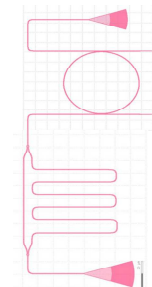
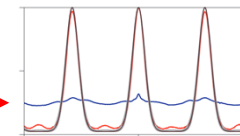
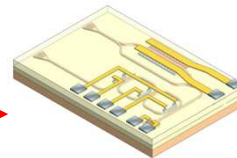
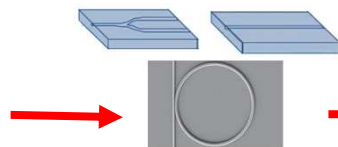
Проектирование и изготовление ФИС



Концепция Базовые элементы

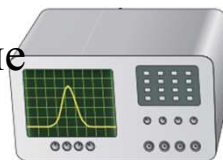


Моделирование ФИС

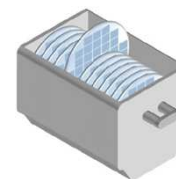


Проектирование ФИС

Тестирование



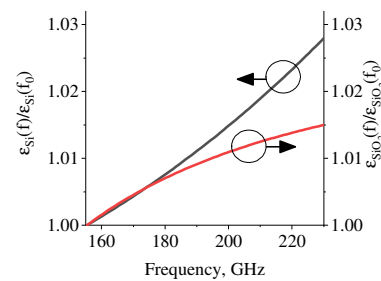
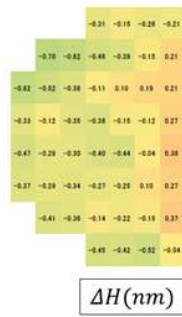
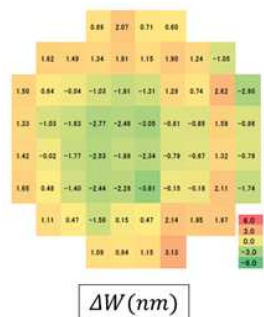
ФИС



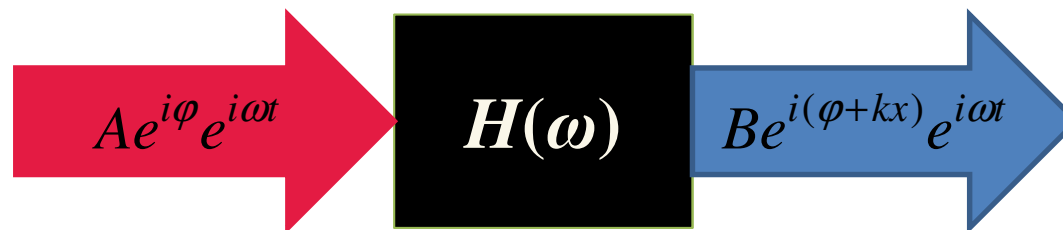
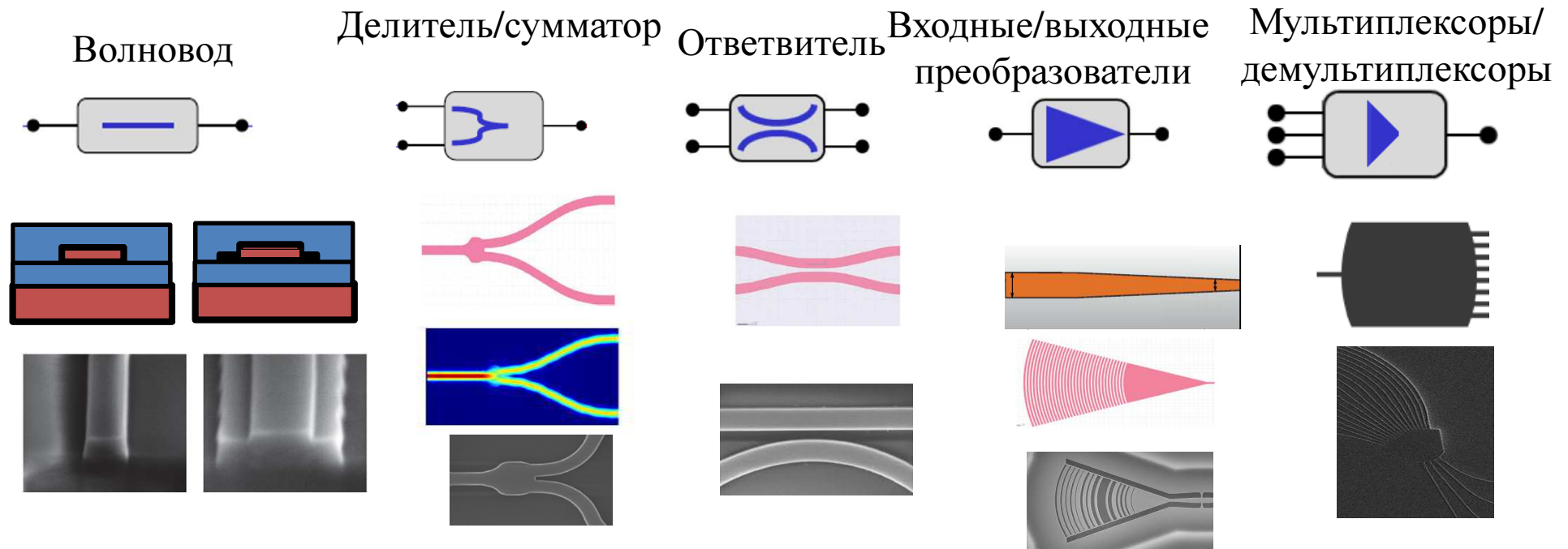
Дизайн ФИС

Изготовление ФИС

Bogaerts W., Chrostowski L. Laser & Photonics Reviews 12 (4) (2018).

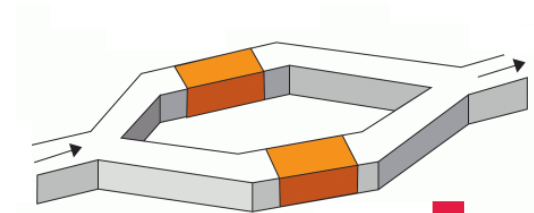
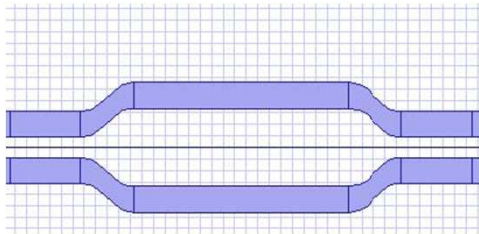
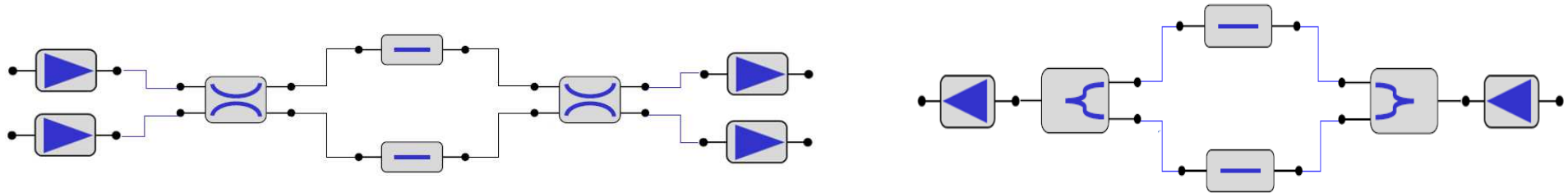


Базовые элементы кремниевой ФИС

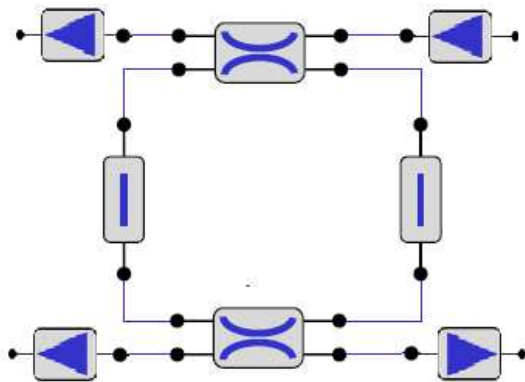


Схемы на основе базовых элементов

Интерферометры Маха-Цендера

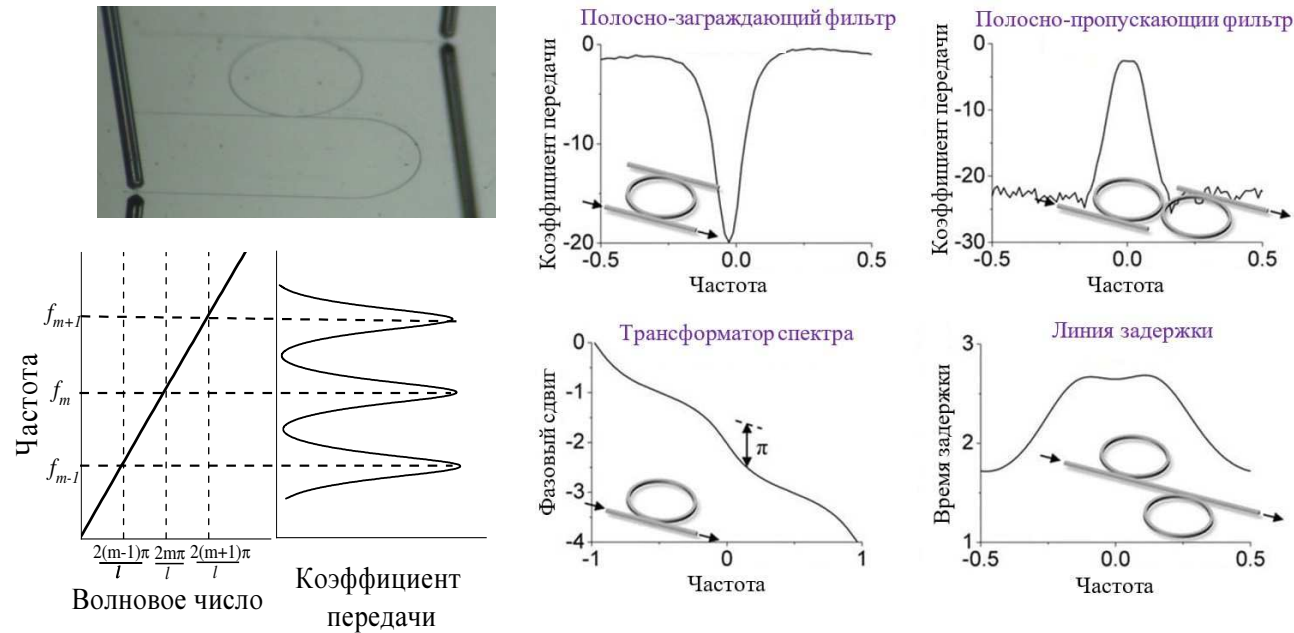


Микрокольцевые резонаторы



$$H(\omega)$$

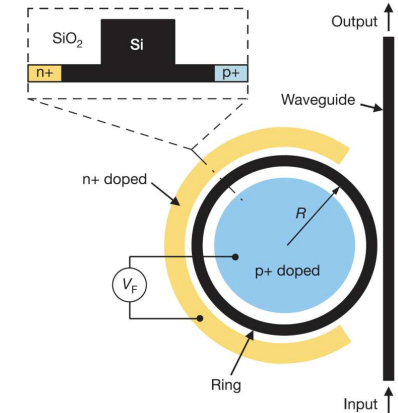
Устройства на основе базовых элементов



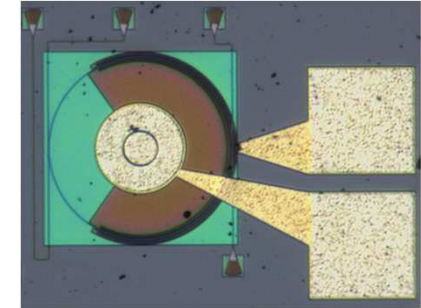
Практические применения кремниевых МКР

- ✓ Линии задержки.
- ✓ Фильтры.
- ✓ Электрооптические модуляторы.
- ✓ Линейные и нелинейные элементы для нейронных сетей.

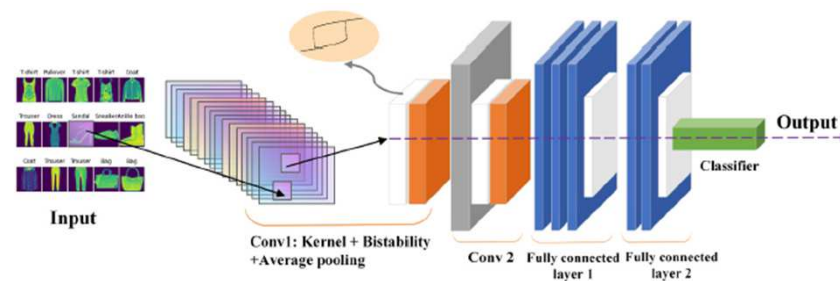
Кольцевой модулятор



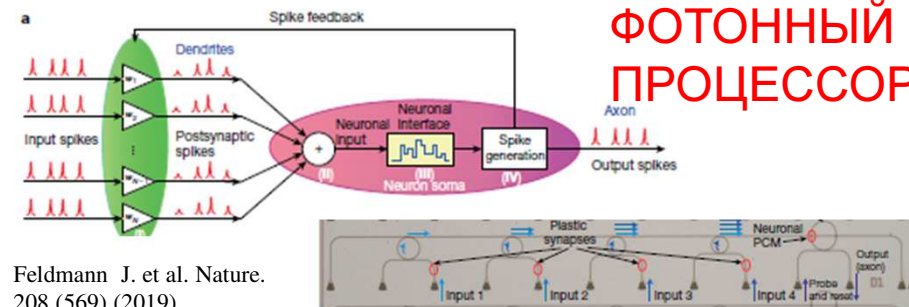
Xu, Q., Schmidt, B. *Optics express*, 14(20) (2006).



ФОТОННЫЙ ПРОЦЕССОР



Zhang H. et al. *Optics Communications*. 58 (2024).

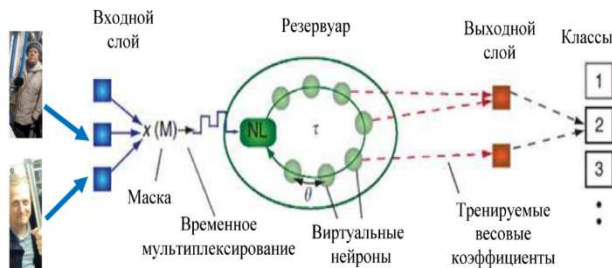


Feldmann J. et al. *Nature*. 208 (569) (2019).

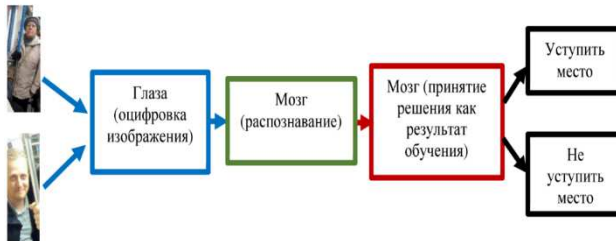
Физические резервуарные вычисления – новое направление искусственного интеллекта

Задачи распознавания и классификации с помощью фотонных процессоров

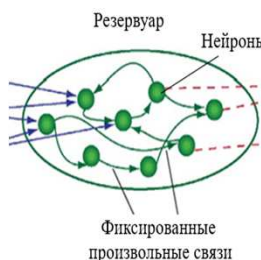
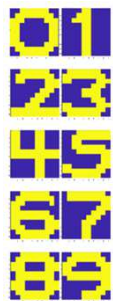
Программная реализация резервуарного компьютера



Аналогия с человеческим мышлением

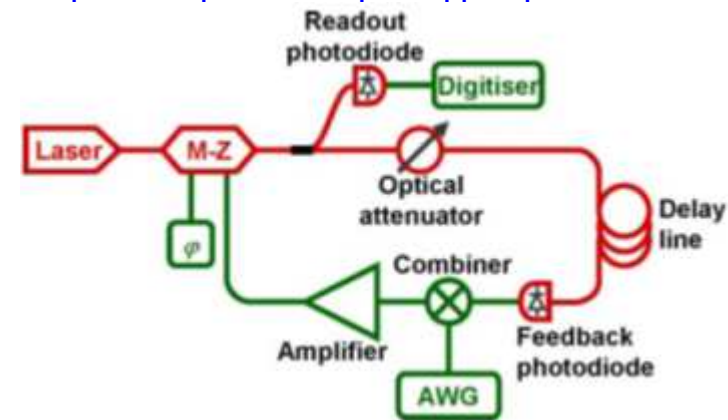


Распознавание цифр

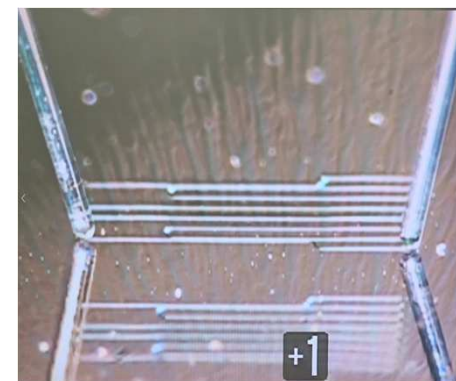


True digit	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	24										100%
1		26									100%
2	1		29								97% 3%
3	1			27							96% 4%
4					29						100%
5						30					100%
6	2						31				94% 6%
7								25			100%
8	1								18		95% 5%
9										24	100%
False digit	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Аппаратная реализация в дискретном исполнении



Аппаратная реализация на основе микрокольцевого резонатора



Драчев В.П.

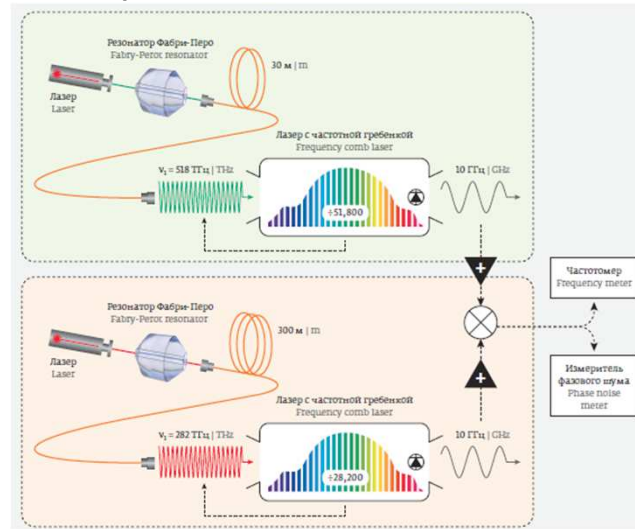


Skoltech
Сколковский институт науки и технологий

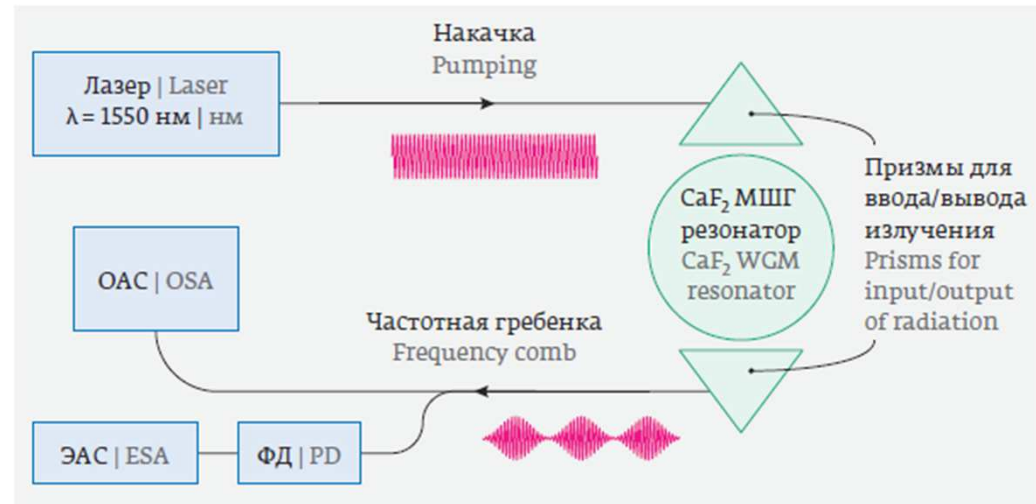
- ✓ Работа находится на стадии предпроектной подготовки, макеты выполнены в дискретном исполнении
- ✓ Результаты: теория, расчетные модели интегральных схем радиофотоники, технология изготовления
- ✓ Потребность в инвестициях 600 млн. руб.

Генерация сигналов с использованием технологий радиофотоники

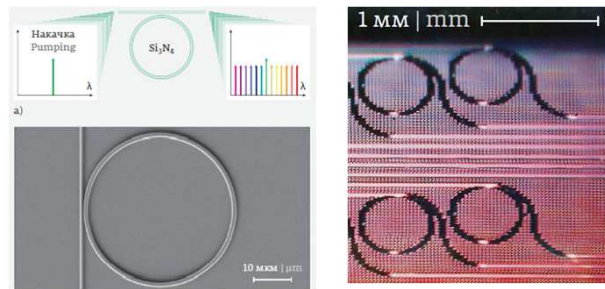
ОЭГ на импульсных лазерах с синхронизацией мод



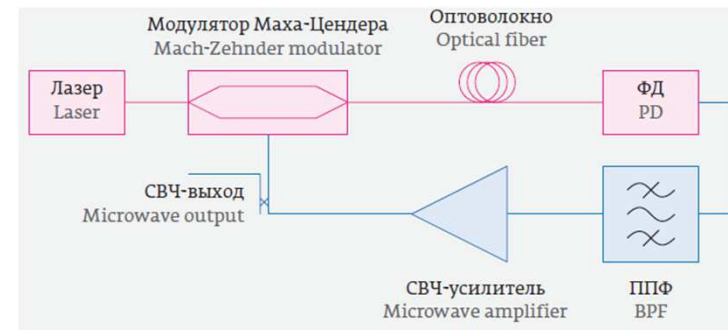
ОЭГ на резонаторах с МШГ



ОЭГ на микрокольцевых резонаторах



ОЭГ на ОВЛП



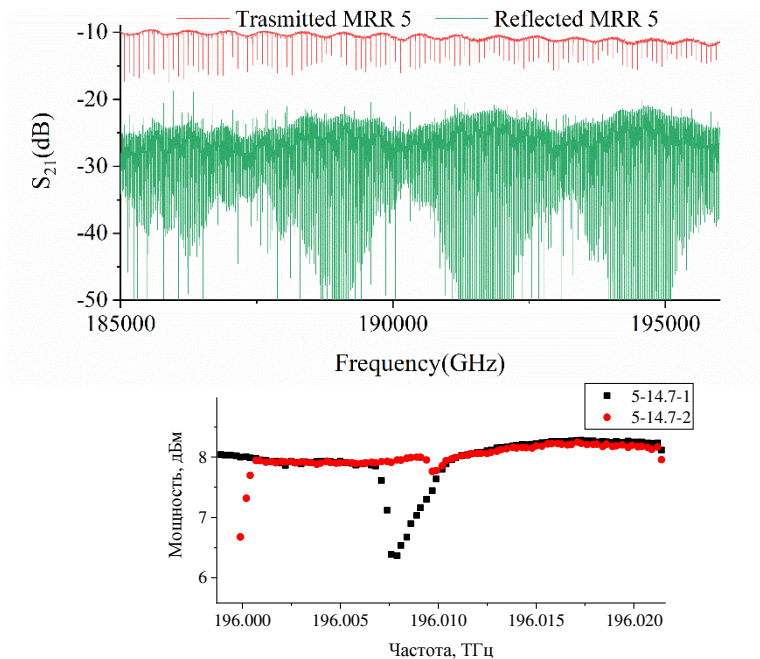
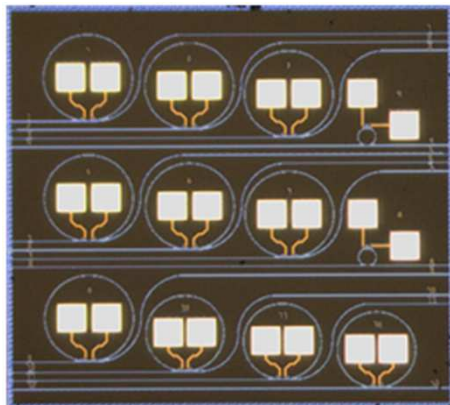
А. Б. Устинов, И. Ю. Таценко, А. А. Никитин, А. В. Кондрашов, А. В. Шамрай, А. В. Иванов, "Принципы построения оптоэлектронных СВЧ генераторов", Фотоника, том 15, вып. 3, стр. 228-237 (2021) – часть 1; вып. 4, стр. 334-346 (2021) – часть 2

Экспериментальное исследование микрокольцевых резонаторов

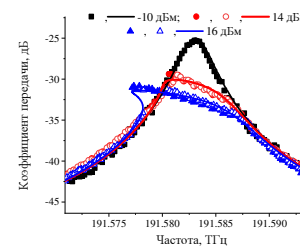
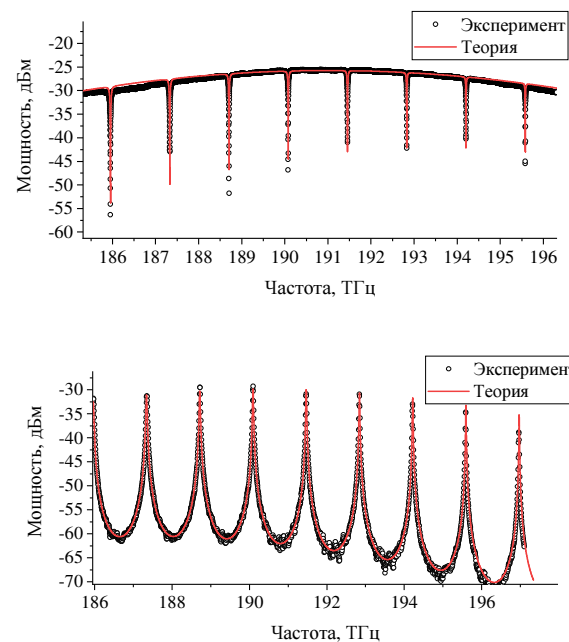
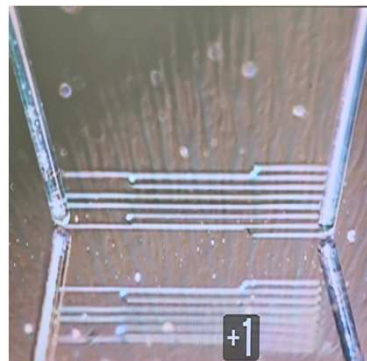
Микрокольцевые резонаторы
из нитрида кремния (Si_3N_4)



Совместно
с ООО «Т8»



Микрокольцевые резонаторы
из кремния (технология КНИ)



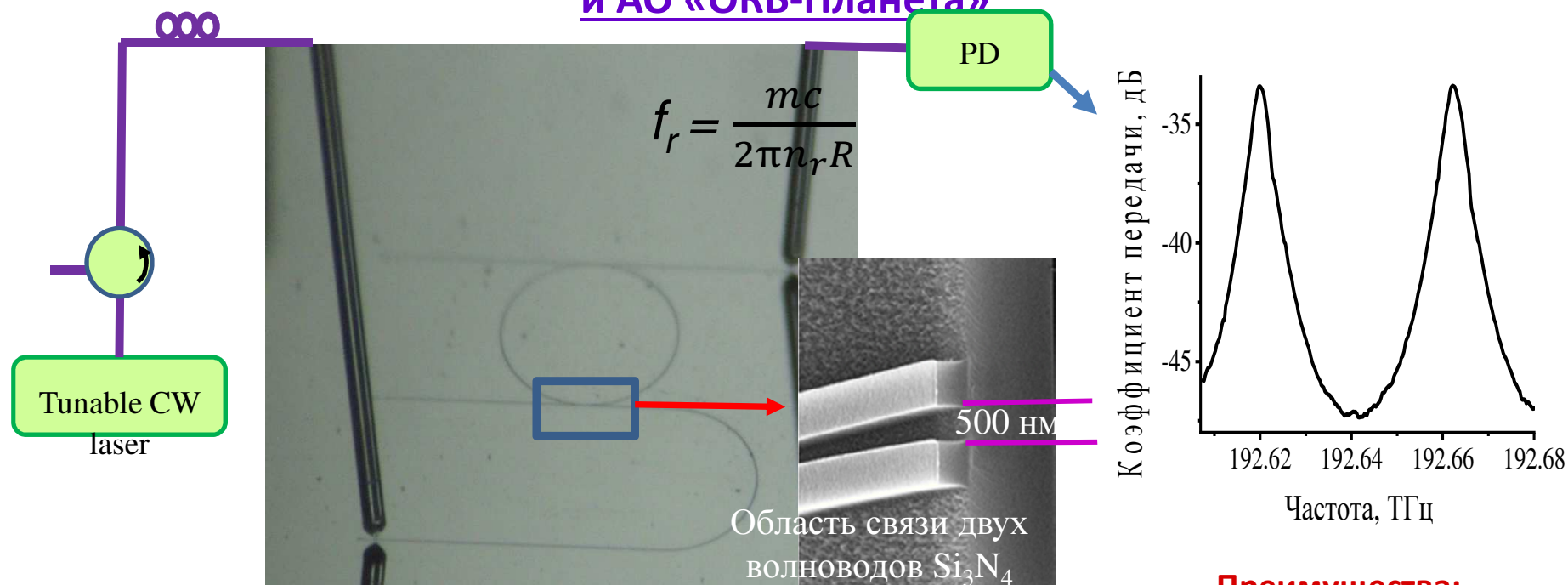
Драчев В.П.



Skoltech
Сколковский институт науки и технологий

Совместно
со Сколтехом

и АО «ОКБ-Планета»

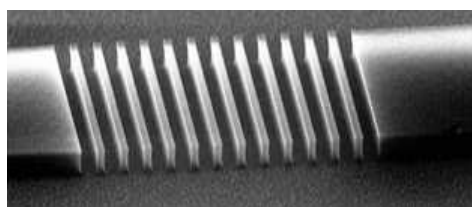
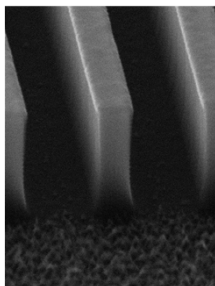


Преимущества:

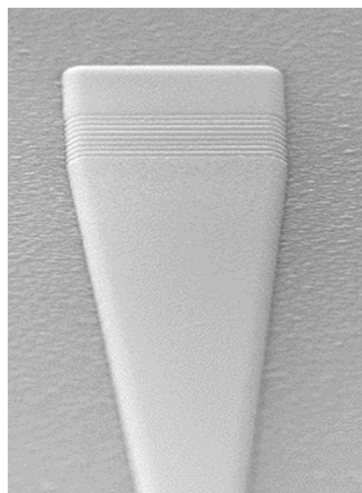
- Сверхширокий диапазон рабочих частот
- Высокая скорость обработки сигнала
- Малые потери
- Малые размеры и вес
- Высокая устойчивость к помехам

Применения:

- ✓ Фильтры
- ✓ Мультиплексоры
- ✓ Модуляторы
- ✓ Линии задержки
- ✓ Фазовращатели
- ✓ Дисперсионные элементы
- ✓ Гироскопы

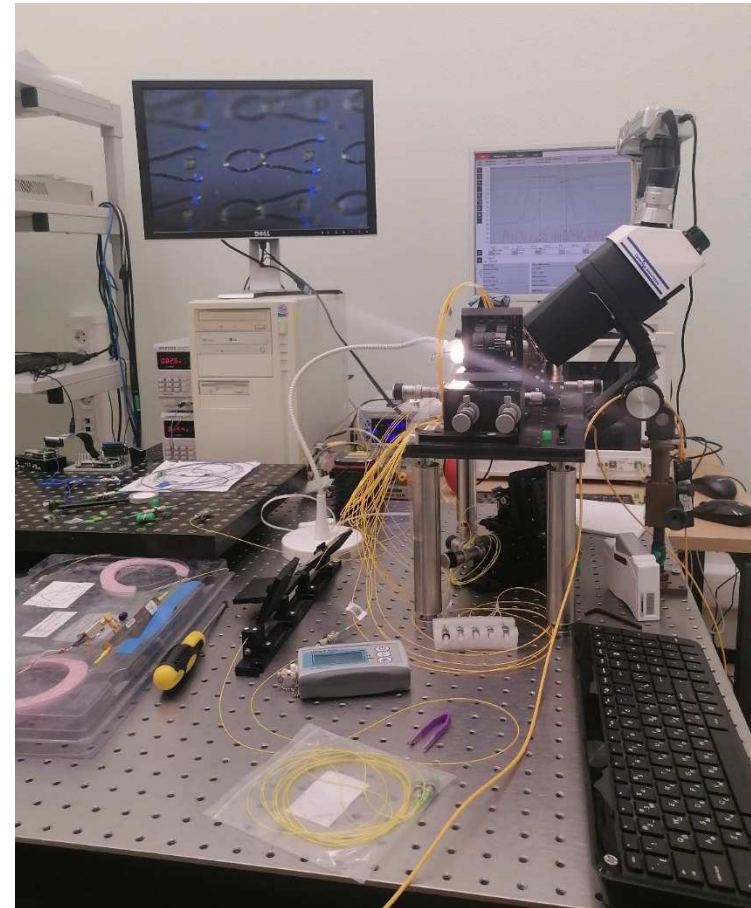


Брегговская решетка в волноводе Si_3N_4



Покрытый SiO_2 волновод Si_3N_4

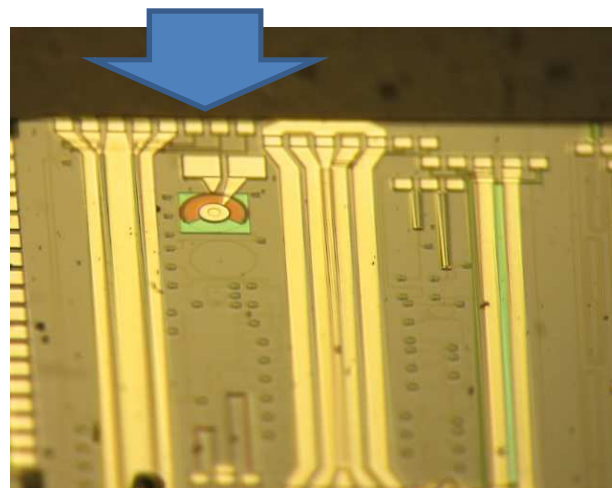
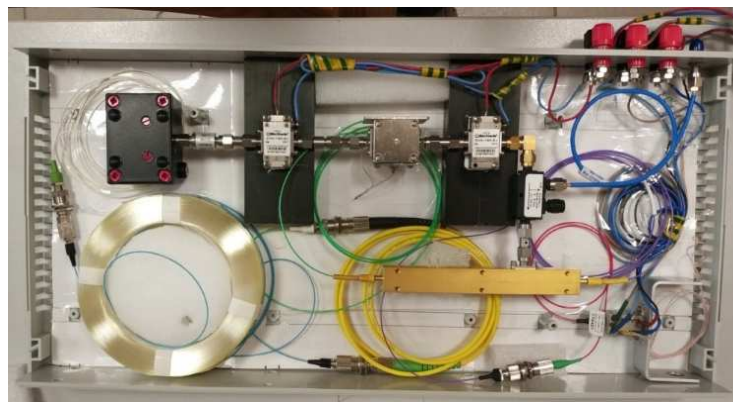
Фотографии лаборатории



Оптоэлектронные СВЧ генераторы: переход от дискретного исполнения к интегральному

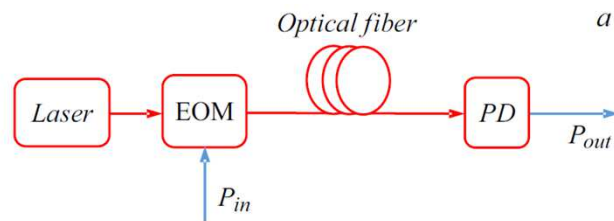


**Получены рекордно низкие
фазовые шумы для
перестраиваемых СВЧ
генераторов**



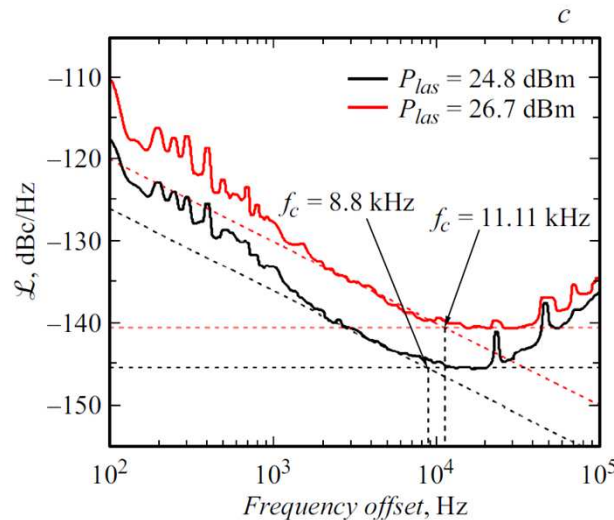
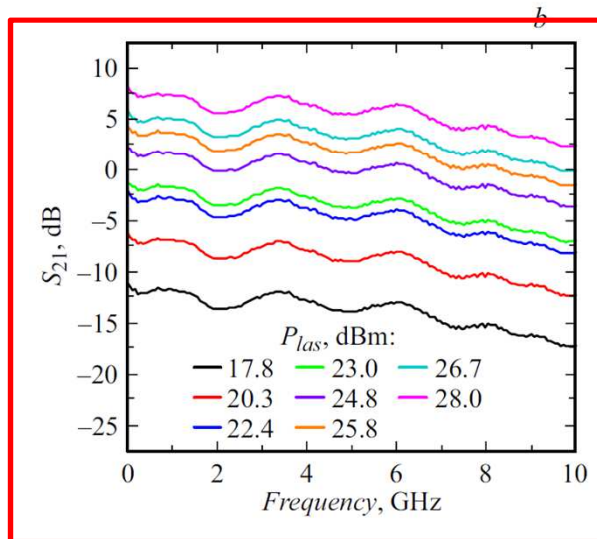
A.B.Ustinov, A.V.Kondrashov, A.A.Nikitin, V.V.Lebedev, A.N.Petrov, A.V.Shamrai, B.A.Kalinikos "A tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics"
J. of Phys.: Conf. Ser. 1326, 012015 (2019).

ОВЛЗ на фотодетекторе с высоким фототоком: отсутствие потерь !



Output power:

$$P_{out} = R \left(P_{las} S J_1 \left(\frac{\pi V_0}{V_\pi} \right) \sin \left(\frac{\pi V_b}{V_\pi} \right) \right)^2$$



Для объяснения зависимости фазового шума нами впервые был измерен и изучен спектр вносимого фазового шума оптоволоконной линии передачи. Показана зависимость фликкер-шума ОВЛП от мощности лазера.

И.Ю.Таценко, А.Б. Устинов, «Автогенерация малощумящего сверхвысокочастотного сигнала в оптоэлектронном генераторе с пассивным оптическим усилением», ЖТФ, том 93, вып. 11, стр. 1645 (2023).

И.Ю.Таценко, А.Б. Устинов, «Исследование оптоволоконной линии с положительным коэффициентом передачи аналогового сверхвысокочастотного сигнала» Радиотехника и электроника. Т.69. Вып. 3. С. 299-304 (2024).

Спасибо за внимание !



Лаборатория радиофотоники им. Б.А.Калиникова создана в 2021 году в СПбГЭТУ при поддержке мегагранта, направленного на реализацию научно-исследовательского проекта «Резервуарные компьютеры как новое направление искусственных нейронных сетей». Руководитель лаборатории А.Б. Устинов



Исследования поддержаны Минобрнауки

e-mail: ustinov-rus@mail.ru