

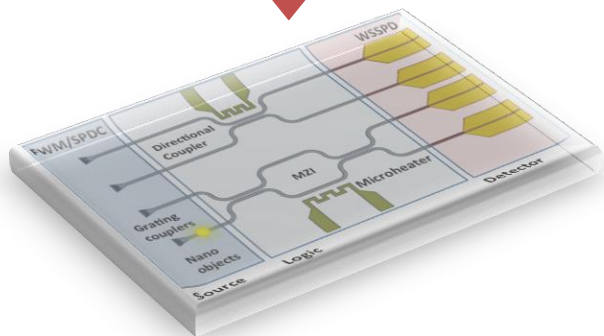
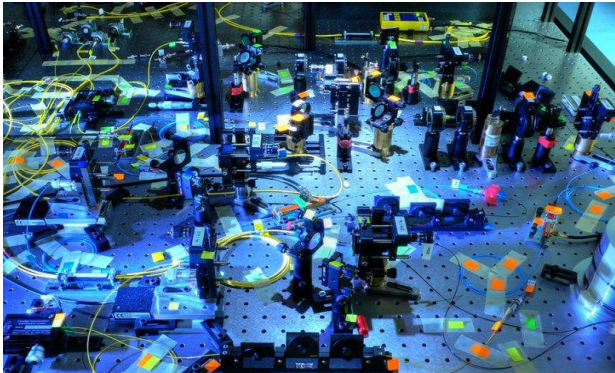
**ТИНФОТОНИКА**

терагерцовая и инфракрасная фотоника

**Инновационная отечественная компания,  
занимающаяся разработкой и изготовлением фотонных  
интегральных схемы видимого, инфракрасного и  
терагерцевого диапазонов**

# Концепция

Замена громоздких оптических квантовых схем на квантовые оптические микросхемы (QPICs)



Размеры чипа  $<1 \text{ см}^2$ , количество элементов практически не ограничено

## Преимущества:

- ✓ Устойчивость к внешним воздействиям
- ✓ Стабильность в работе
- ✓ Масштабируемость
- ✓ Малые габариты чипа
- ✓ Малое потребление энергии
- ✓ Низкая себестоимость

## Услуги:

- ✓ Численное моделирование элементов
- ✓ Разработка дизайна
- ✓ Изготовление
- ✓ Тестирование
- ✓ Оптимизация готовых устройств

# Численное моделирование

## Численный расчет параметров:

- ✓ Волноводов
- ✓ Интерферометров
- ✓ Резонаторов
- ✓ Делителей луча
- ✓ Каплеров

## Численный расчет :

- ✓ Эффективного показателя преломления
- ✓ Группового показателя преломления
- ✓ Глубины модуляции
- ✓ Пропускания
- ✓ Отражения

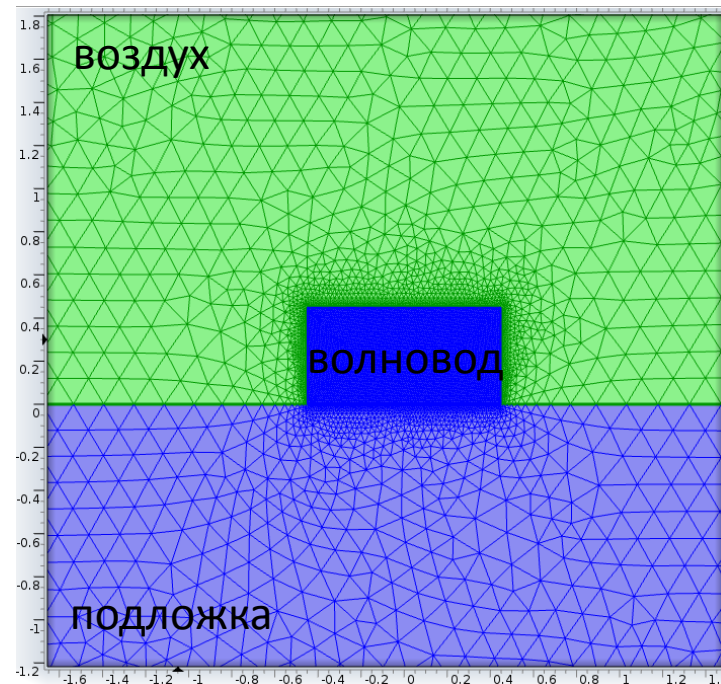
## Размерность:

- ✓ 1D, 2D, 3D

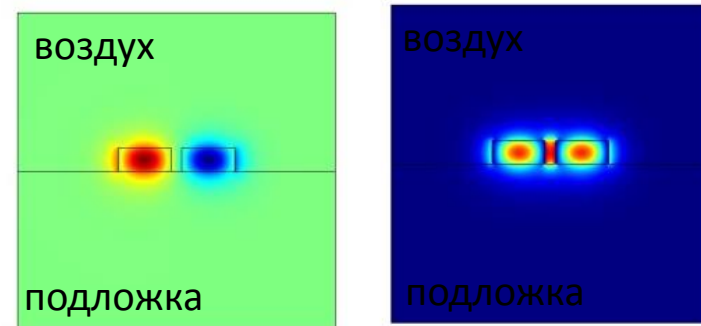
## Применение:

Интегральная оптика

2D-модель волновода



2D-модель направленного ответвителя



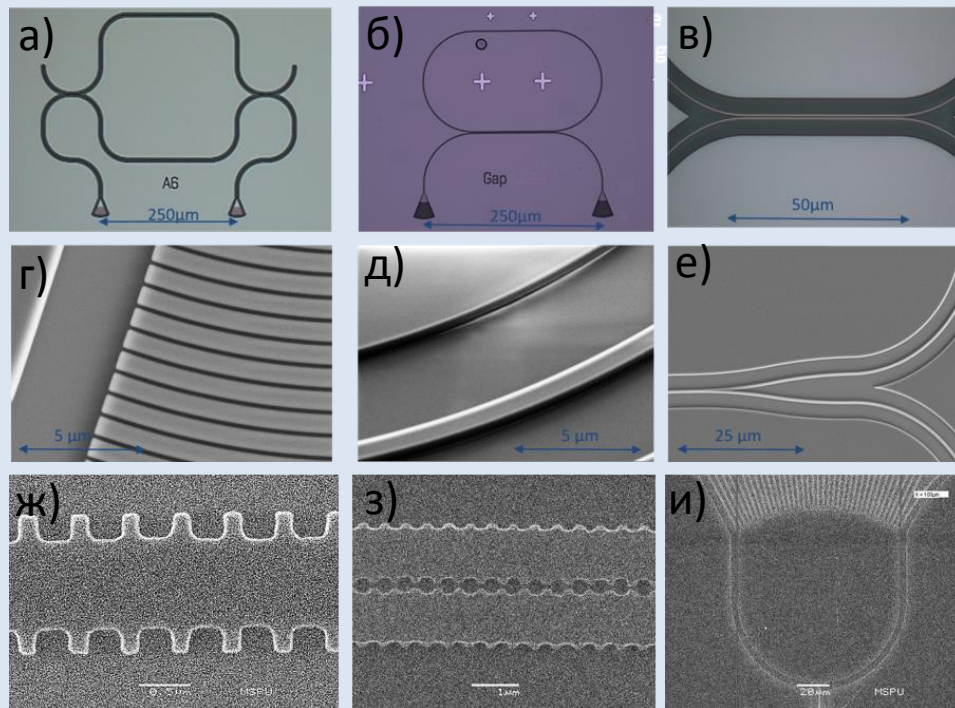
Анти симметричная

Симметричная

# Доступные элементы

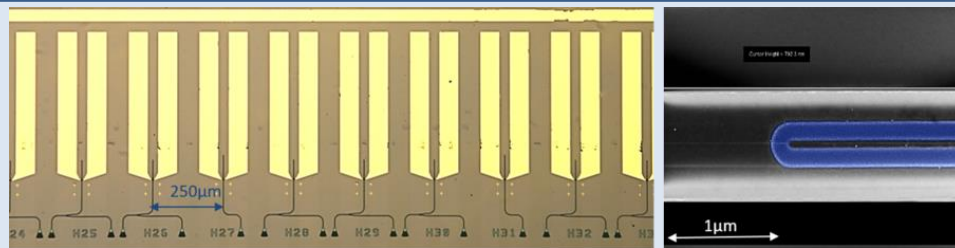
## Не требующие охлаждения:

- а) интерферометры Маха-Цендера
- б) кольцевые резонаторы
- в) направленные ответвители
- г) дифракционные решетки (каплеры)
- д) волноводы
- е) делители луча
- ж) брегговские волноводы
- з) противонаправленные ответвители
- и) демультиплексоры (AWG)



## Требующие охлаждения до 2К

- ✓ Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPDs или SNSPDs)
- ✓ Однофотонный спектрометр



# Волноводы

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы и толщины  
(опционально)

## Тип волновода:

- ✓ Полосковый
- ✓ Гребенчатый
- ✓ Другие типы  
(опционально)

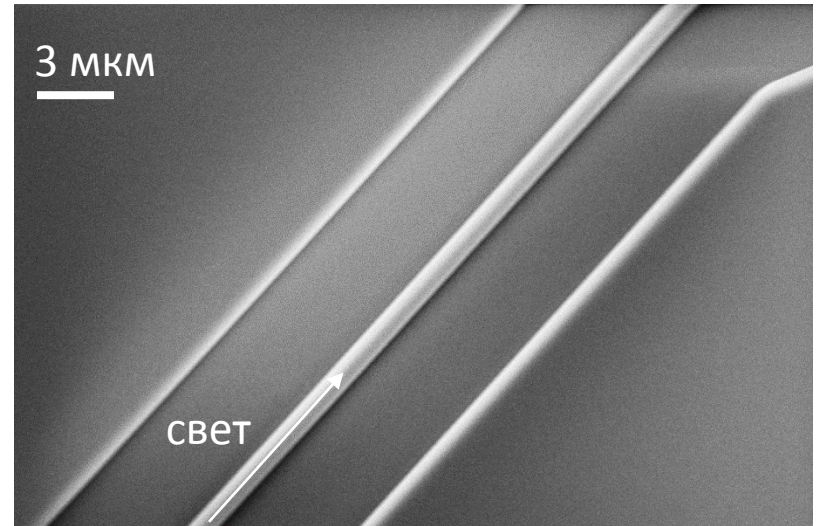
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Поглощение: 2,7 – 3 дБ/см  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Шероховатость стенок: 10-20нм

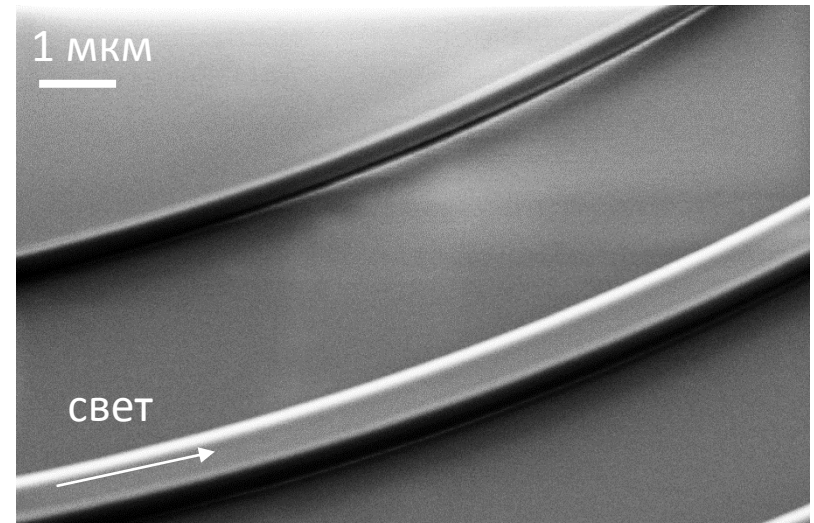
## Применение

Оптическая связь элементов на чипе

SEM фото



SEM фото



# Дифракционная решетка

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

## Тип решетки:

- ✓ Фокусирующая
- ✓ Аподизированная
- ✓ Другие типы  
(опционально)

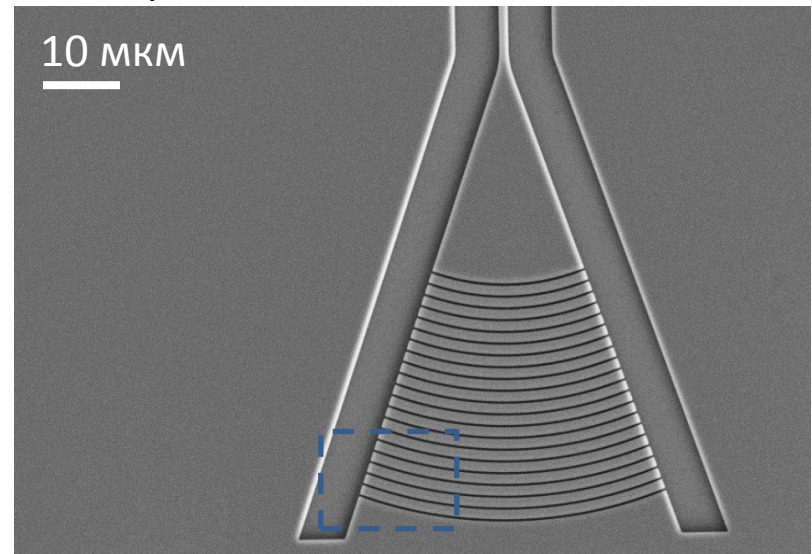
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Эффективность: 20-30%  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Шероховатость стенок: 10-20 нм

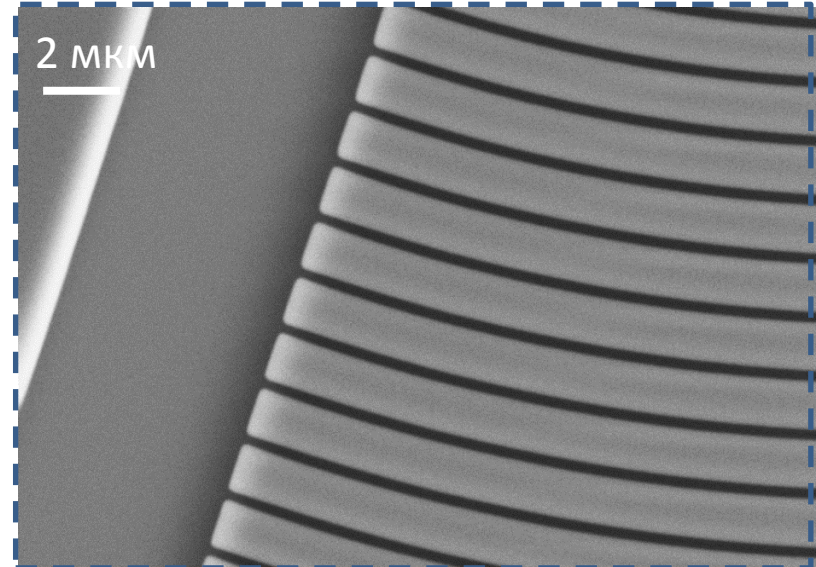
## Применение

Ввод/вывод из  
одномодового оптоволокна

SEM фото



SEM фото (увеличенное изображение)



# Делитель луча

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

## Тип делителя:

- ✓ Y-сплиттер
- ✓ Другие типы  
(опционально)

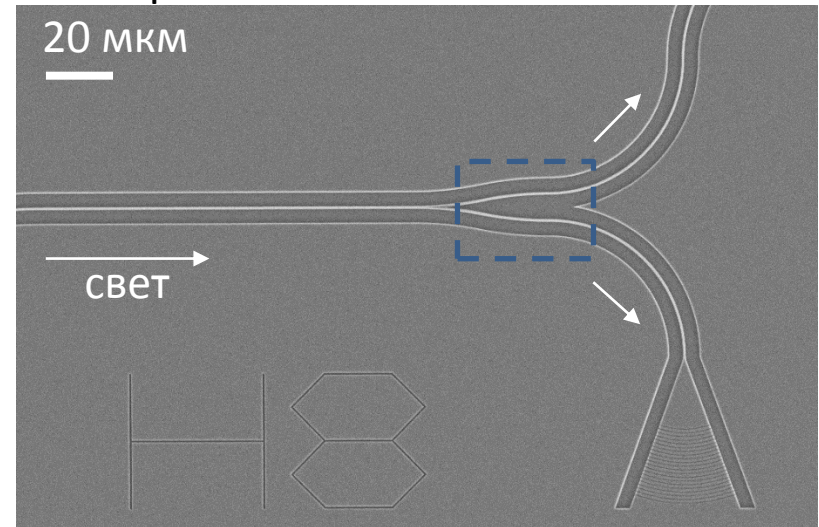
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 0,5$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Коэффициент деления: 50:50, 70:30
- ✓ Произвольный коэффициент деления  
(опционально)

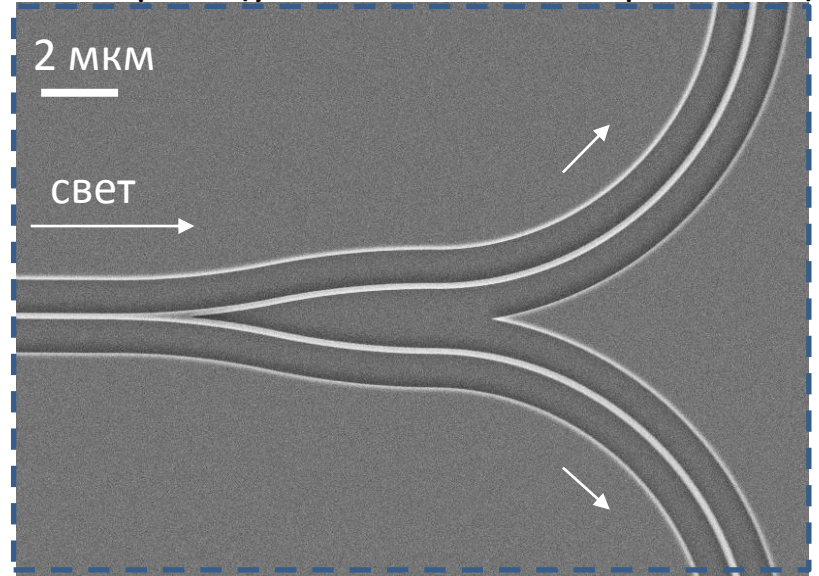
## Применение

Деление света на чипе

SEM фото



SEM фото (увеличенное изображение)



# Направленный ответвитель

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

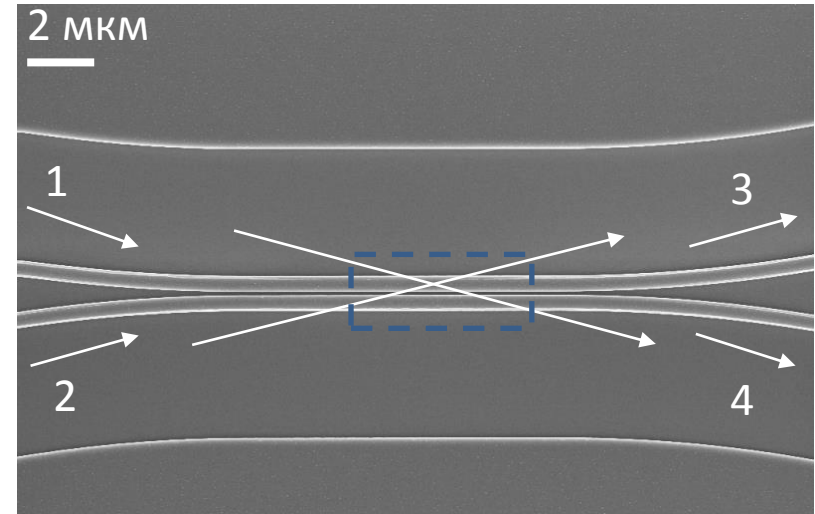
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 0,5$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Коэффициент деления: 50:50, 70:30
- ✓ Произвольный коэффициент деления
- ✓ (опционально)

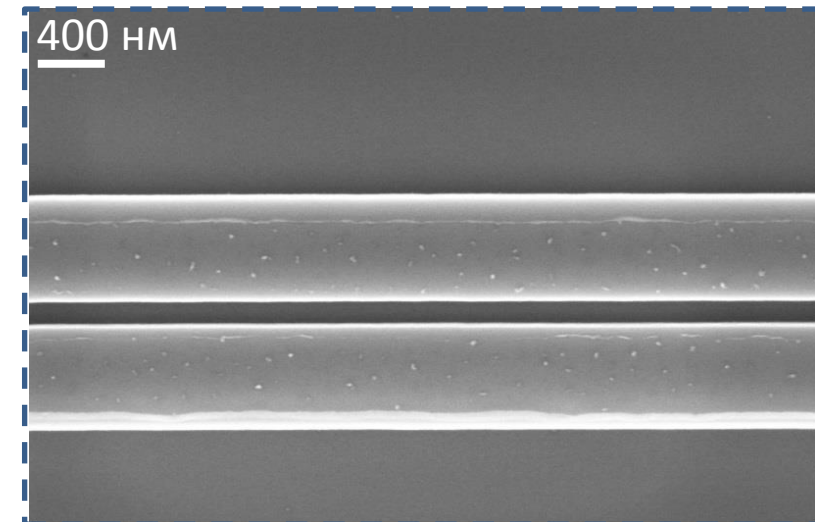
## Применение

Деление света на чипе

SEM фото



Увеличенное SEM фото





# Интерферометр Маха-Цендера

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

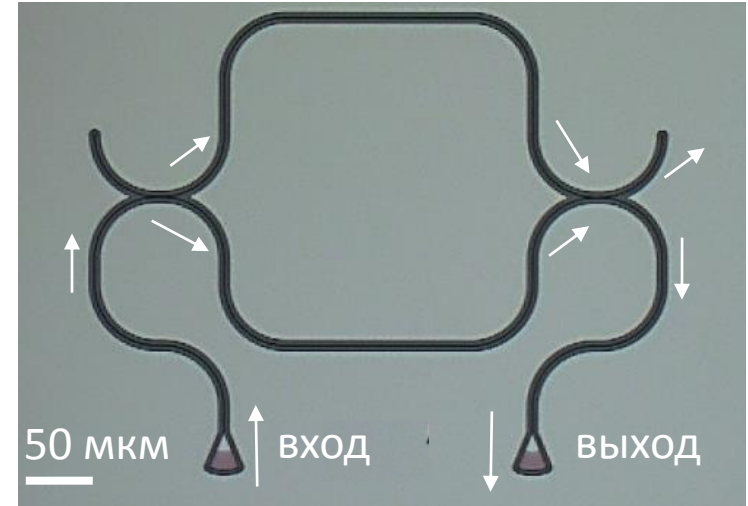
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 1$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Free spectral range (FSR): 11 нм
- ✓ Произвольный FSR  
(опционально)
- ✓ Extinction ratio (ER): 5-30 дБ

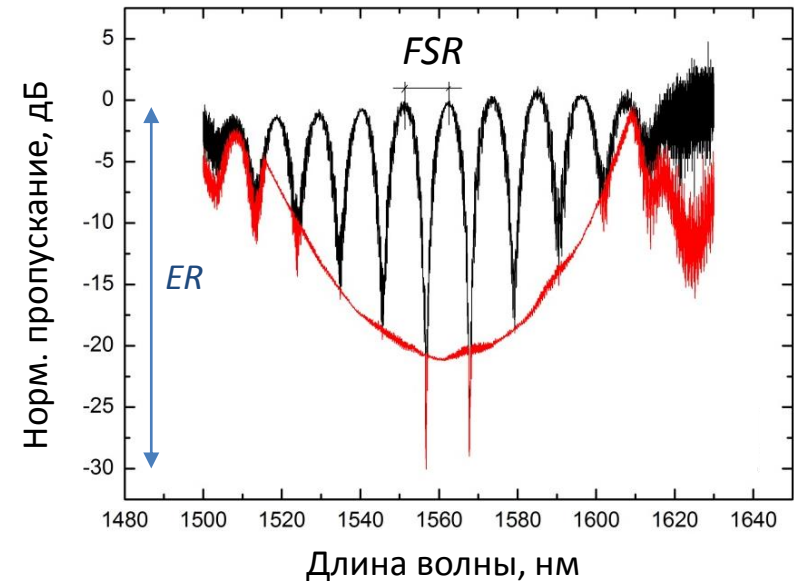
## Применение

Оптические фильтры на чипе

Оптическое фото



Результаты



# Кольцевой резонатор

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

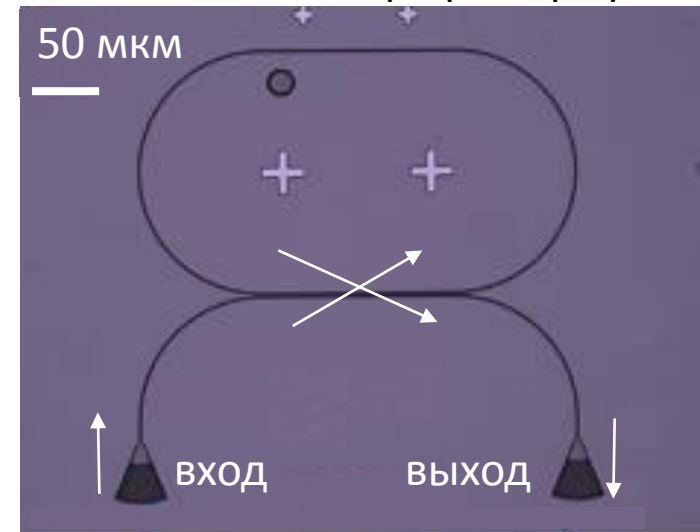
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 1$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Free spectral range (FSR): 2-5 нм
- ✓ Произвольный FSR  
(опционально)
- ✓ Q-фактор:  $> 200\,000$

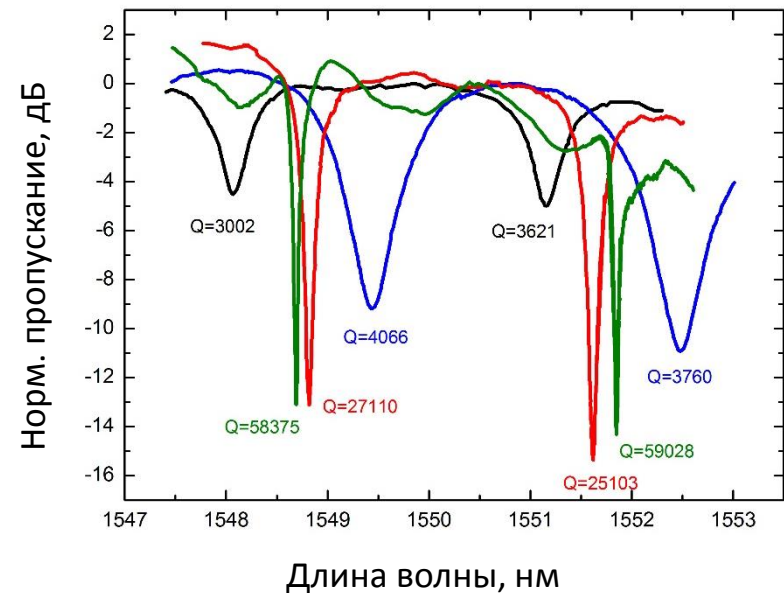
## Применение

Оптические фильтры на чипе

## Оптическая микрофотография



## Результаты



# Бреговский волновод

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

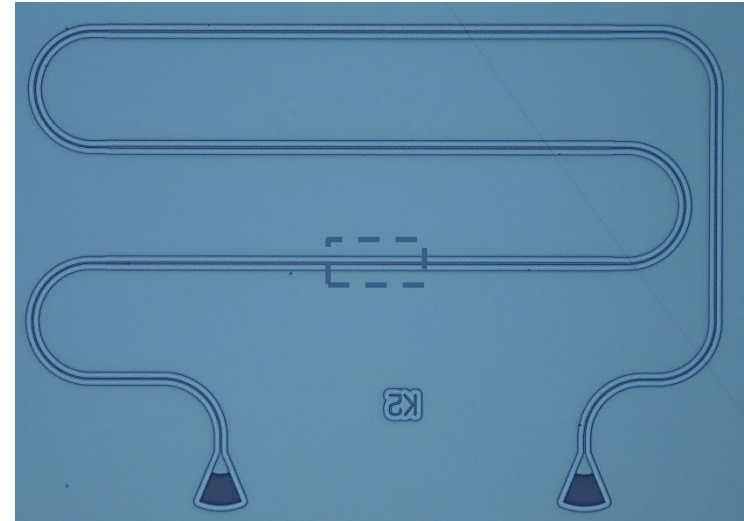
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 1$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Ширина линии фильтра 2-10 нм
- ✓ Произвольная ширина  
(опционально)
- ✓ Глубина фильтрации: 5-40 дБ
- ✓ Произвольная глубина фильтрации  
(опционально)

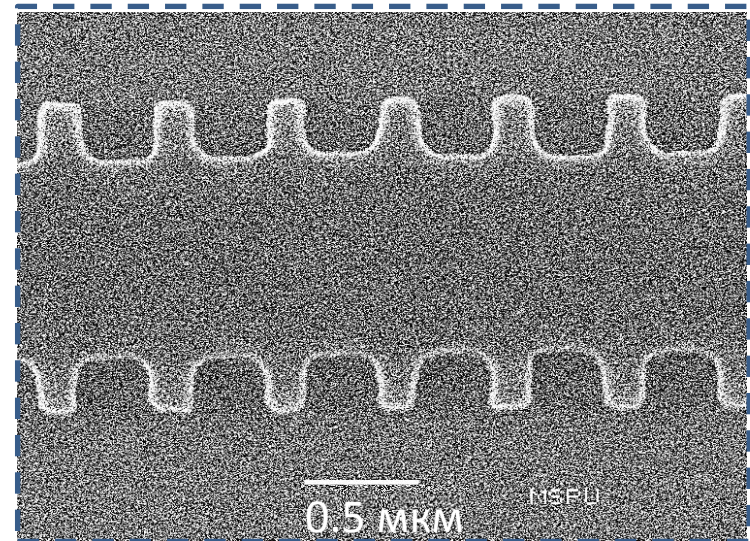
## Применение

Оптические фильтры на чипе

Оптическая микрофотография



SEM фото



# Противонаправленный ответвитель

## Материал:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

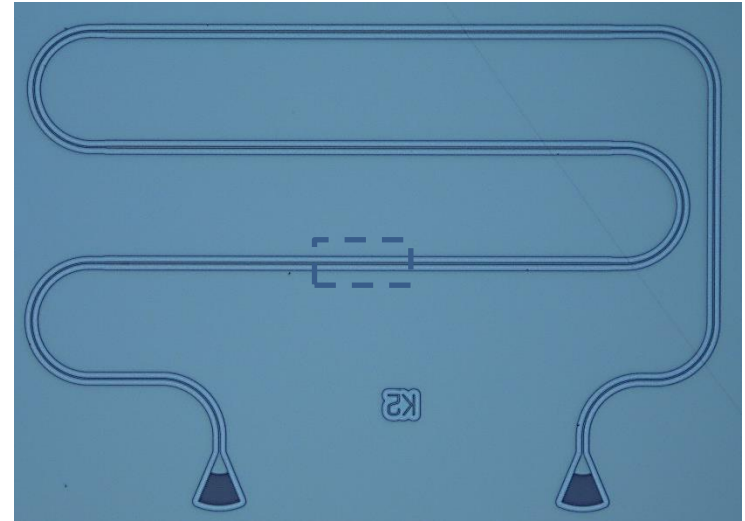
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери:  $< 1$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Ширина линии фильтра 2-10 нм
- ✓ Произвольная ширина  
(опционально)
- ✓ Глубина фильтрации: 5-40дВ
- ✓ Произвольная глубина фильтрации  
(опционально)

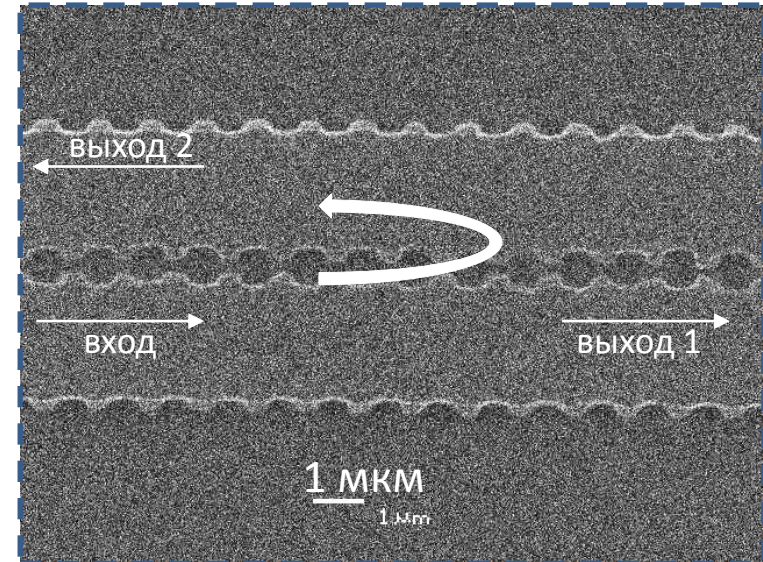
## Применение

Оптические фильтры на чипе

Оптическая микрофотография



SEM фото



# AWG демультимплексор

## Материал подложки:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

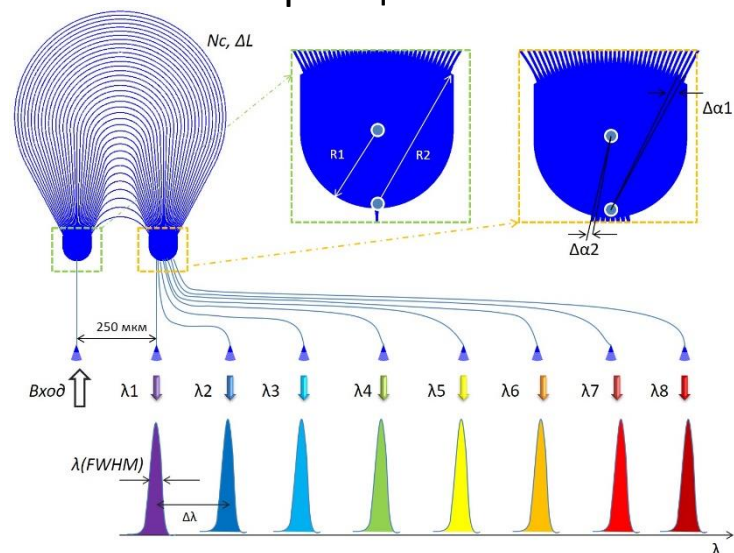
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери: < 3 дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Ширина канала 2 нм
- ✓ Произвольная ширина  
(опционально)
- ✓ Количество каналов: 8
- ✓ Произвольное количество  
(опционально)

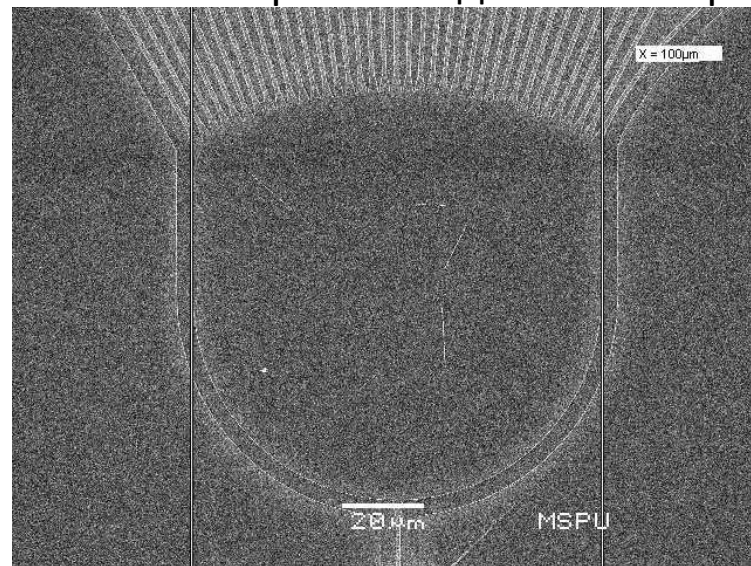
## Применение

Оптические фильтры на чипе

## Принципиальная схема



## SEM фото звездного каплера



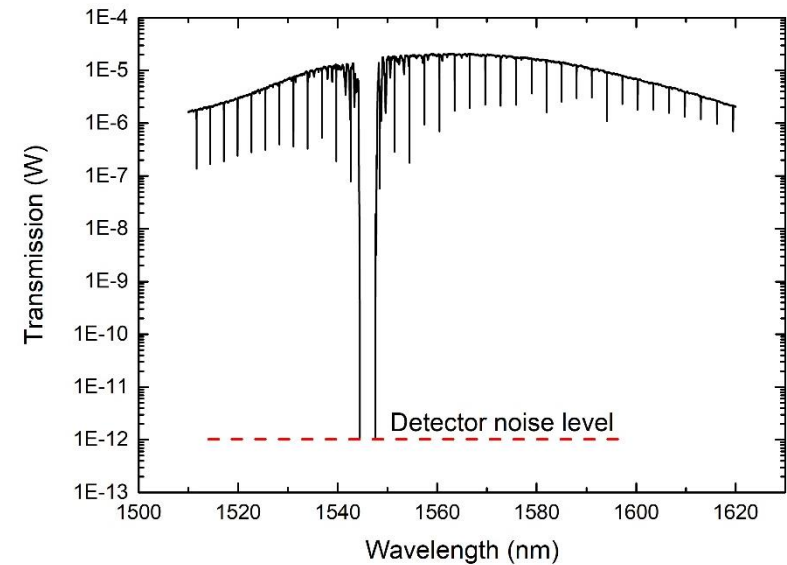
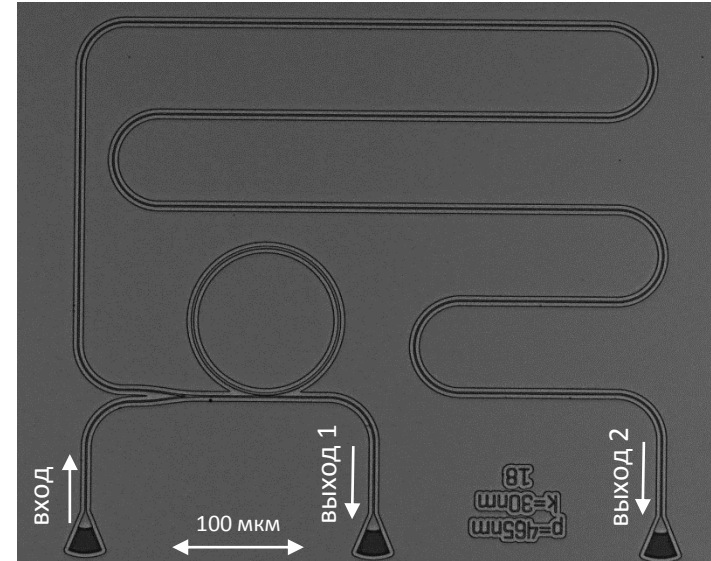
# Резонатор и фильтр

## Материал подложки:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери схемы:  $< 2$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ FSR = 3 нм
- ✓ Добротность  $> 200\,000$
- ✓ Брегговский фильтр FWHM = 3 нм
- ✓ Брегговский фильтр FWHM = 3 нм



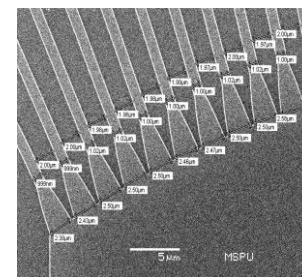
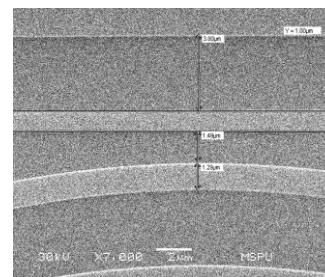
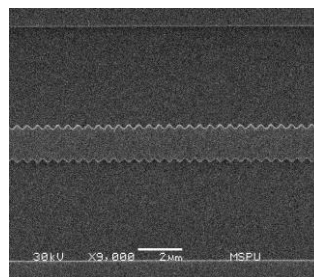
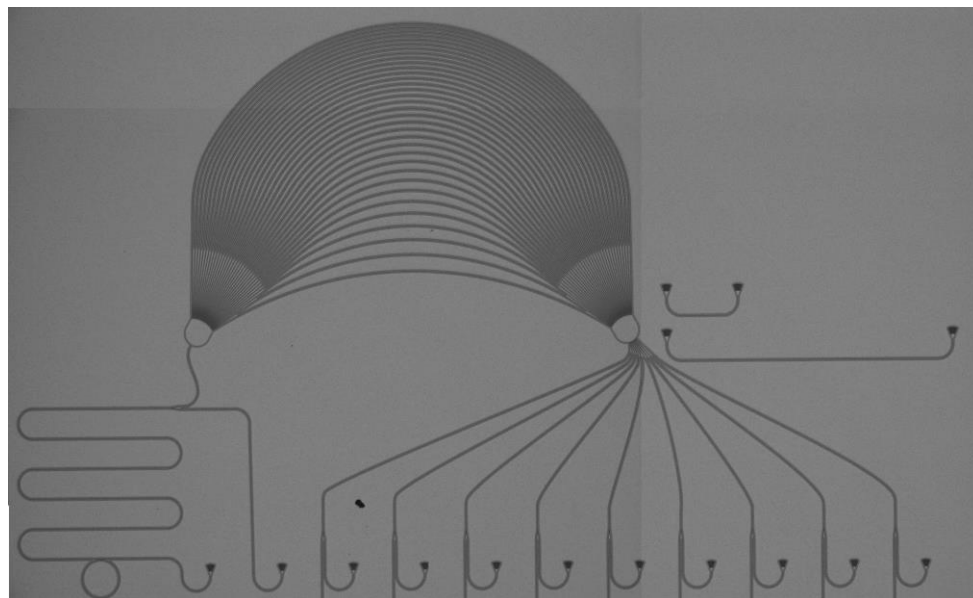
# Резонатор и фильтр

## Материал подложки:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

## Достигнутые характеристики:

- ✓ Потери схемы:  $< 6$  дБ  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ FSR = 3 нм
- ✓ Количество каналов: 9
- ✓ Ширина канала FWHM = 2.6 нм
- ✓ Добротность  $> 200\,000$



# Однофотонные детекторы

## Материал подложки:

- ✓ Нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),  
Толщина 200, 330, 450 нм
- ✓ Кремний на изоляторе (SOI)  
Толщина 220 нм
- ✓ Другие материалы  
(опционально)

## Материал детектора:

- ✓ Нитрид ниобия  $\sim 4$  нм

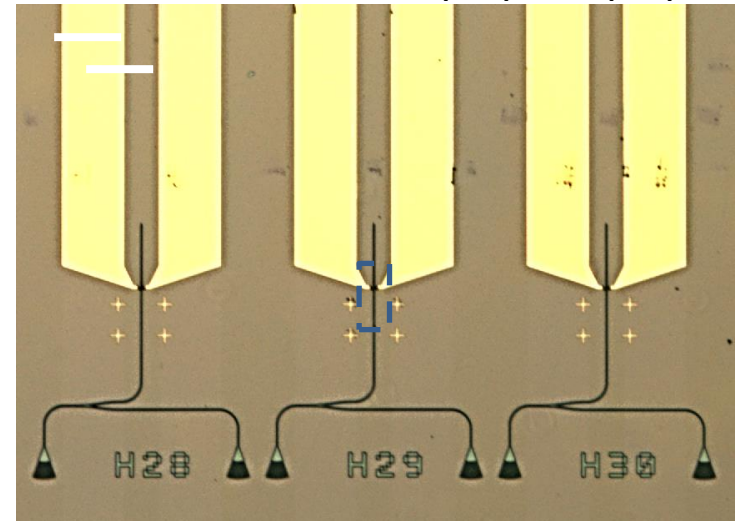
## Достигнутые характеристики:

- ✓ Эффективность детектирования на чипе 90%  
( $\lambda_0 = 1550$  нм)
- ✓ Скорость темновых отсчетов  $< 1$  Гц
- ✓ Скорость счета  $> 100$  МГц
- ✓ Временное разрешение  $< 50$  пс
- ✓ Спектральный диапазон работы 1550 нм
- ✓ 600 – 1600 нм (опционально)

## Применение

Детекторы слабого излучения  
счетчики одиночных фотонов

Оптическая микрофотография

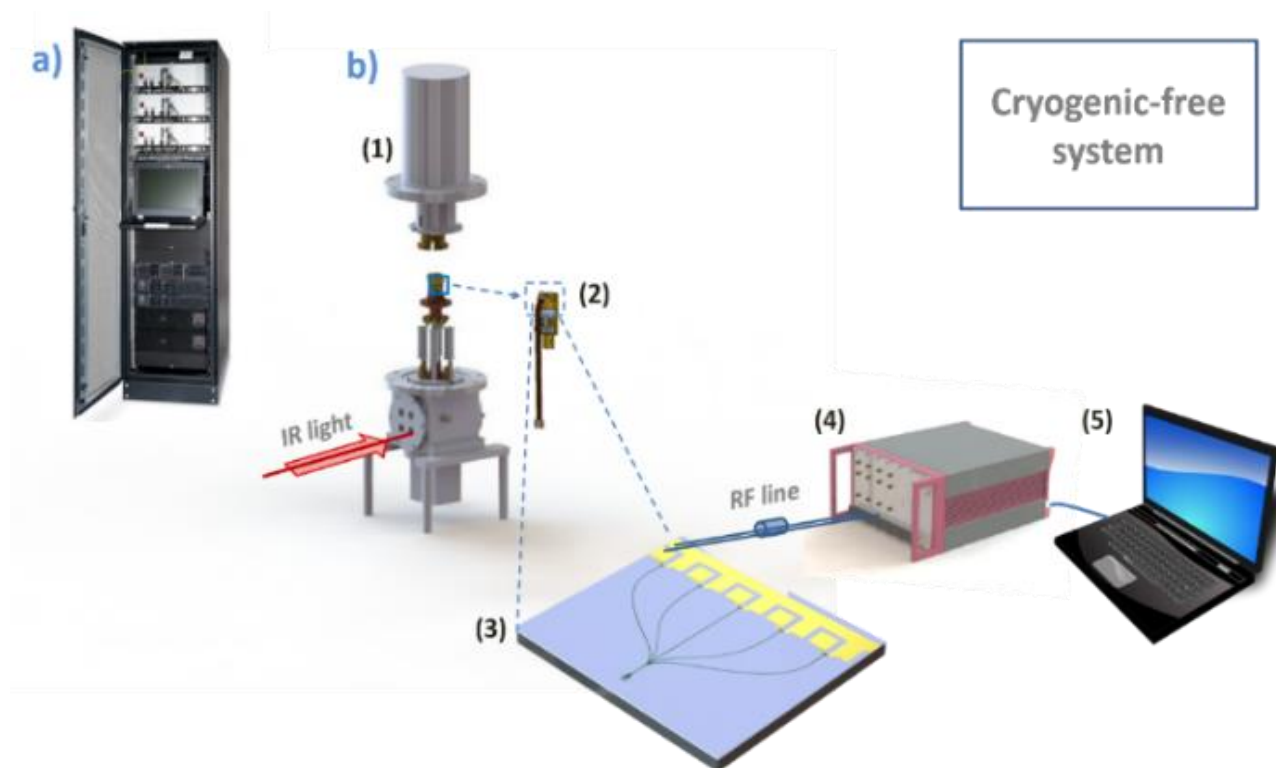


SEM фото





# Готовая система (без жидкого гелия)



## Комплектация:

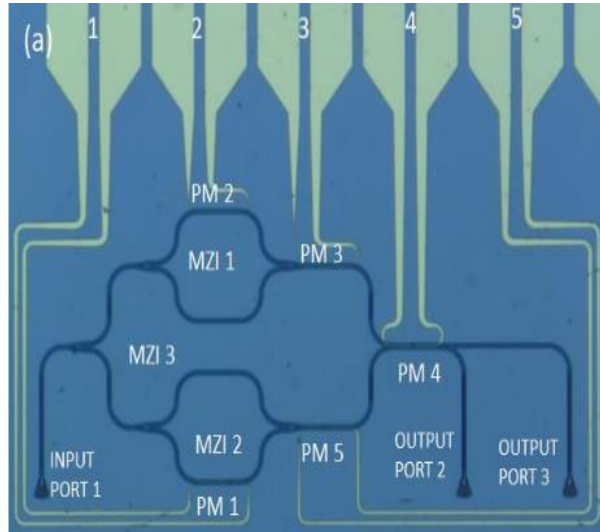
- a) Внешний вид продукта собранный в рэковой стойке.
- b) Составные части продукта:
1. машина замкнутого цикла;
  2. пакетированный чип с держателем;
  3. Увеличенное изображение чипа;
  4. блок управления (Control Unit);
  5. персональный компьютер.

## Характеристики:

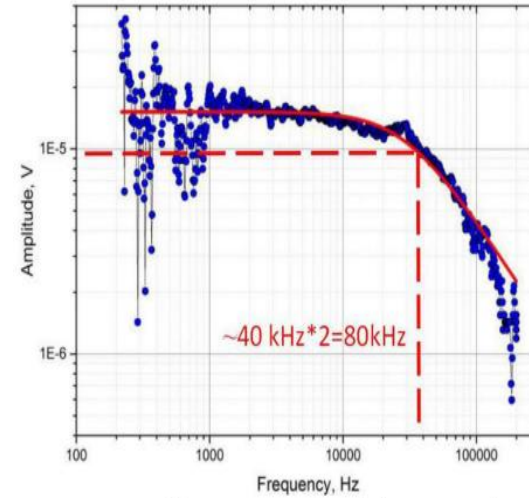
Квантовая эффективность	90%
Временное разрешение	< 40 пс
Мёртвое время	< 15 нс
Количество каналов	< 8
Длина волны	1.3-1.5 мкм

# Microheaters

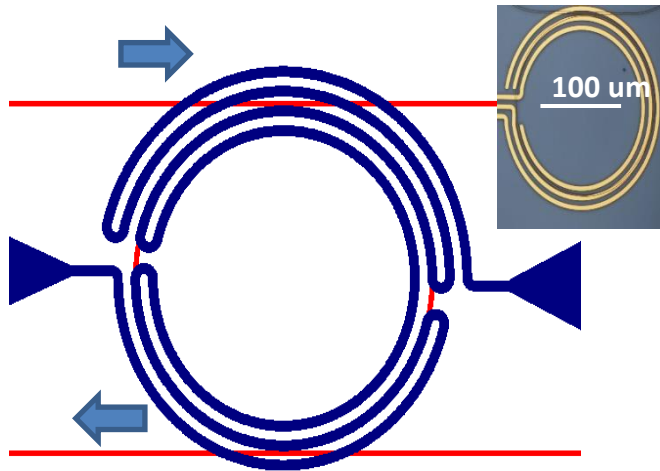
## Parallel MZI and in series



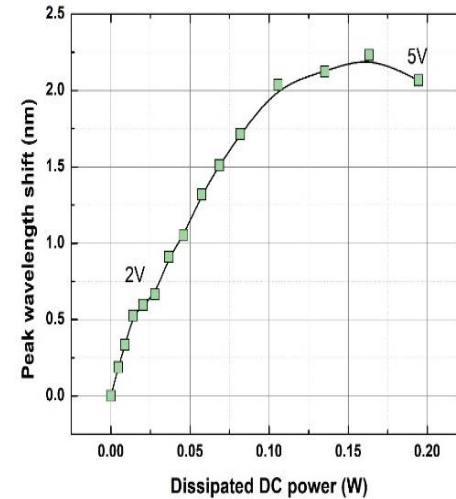
## Bandwidth



## ORR and microheaters: schematic and photo

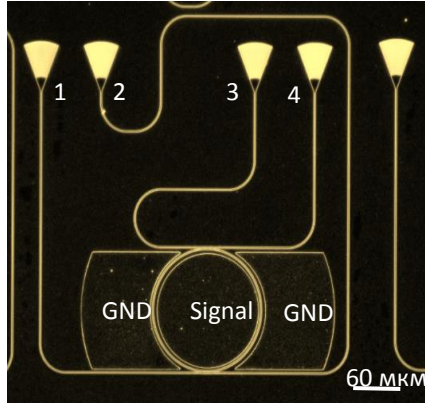


## Peak wavelength shift vs electrical power

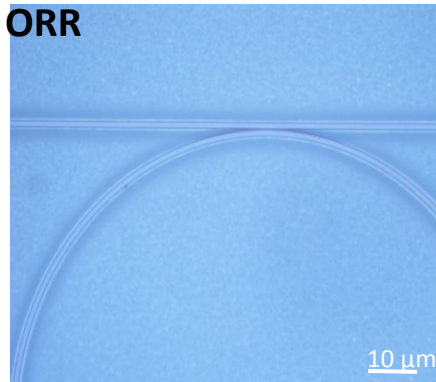


# Nonlinear materials:

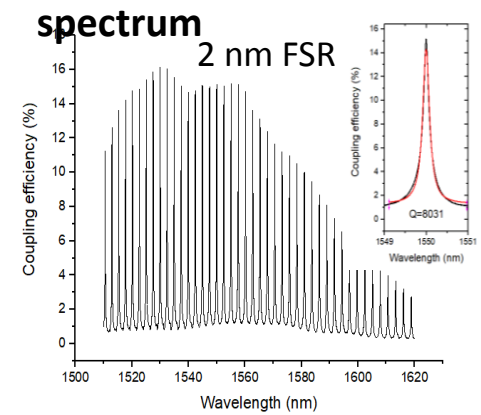
Optical micro photo



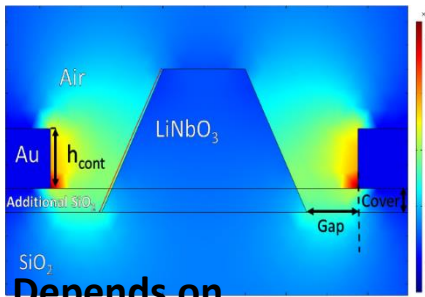
Optical micro photo of ORR



Transmission spectrum

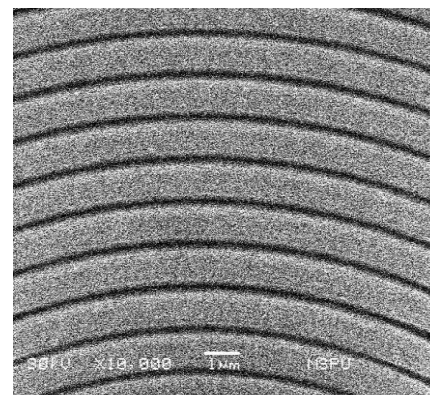


Numerical simulation



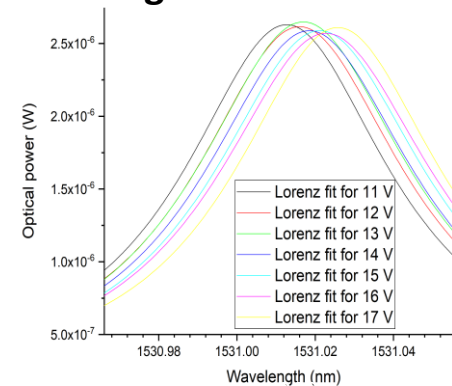
**Depends on dimensions of**  
 -waveguide  
 -gaps  
 - Au contact pads

Grating coupler (SEM)



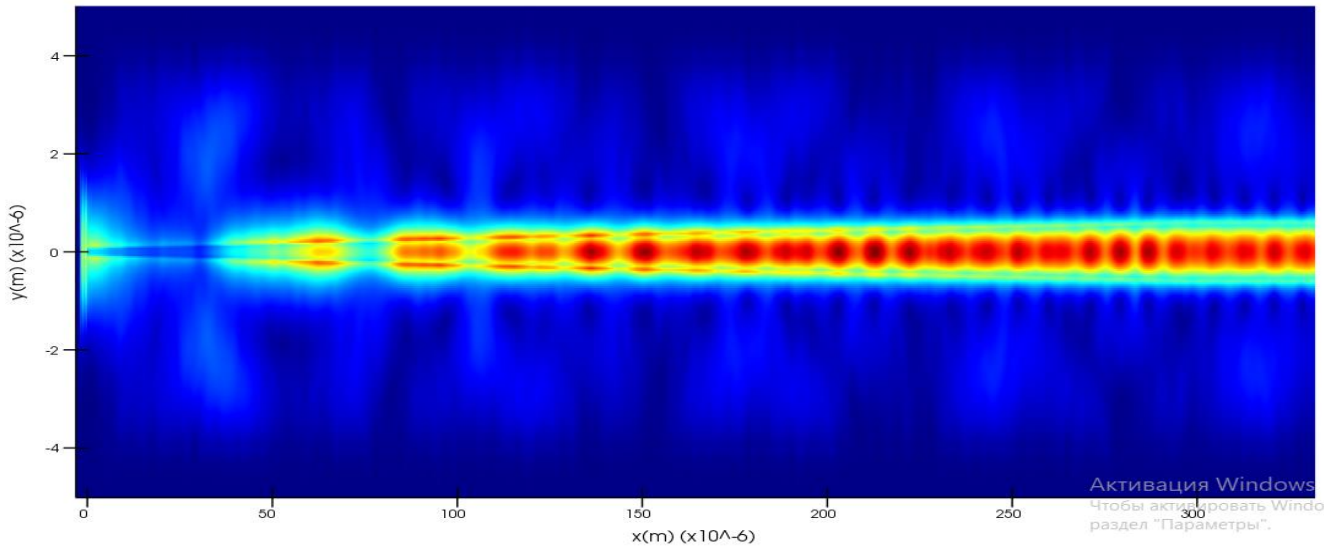
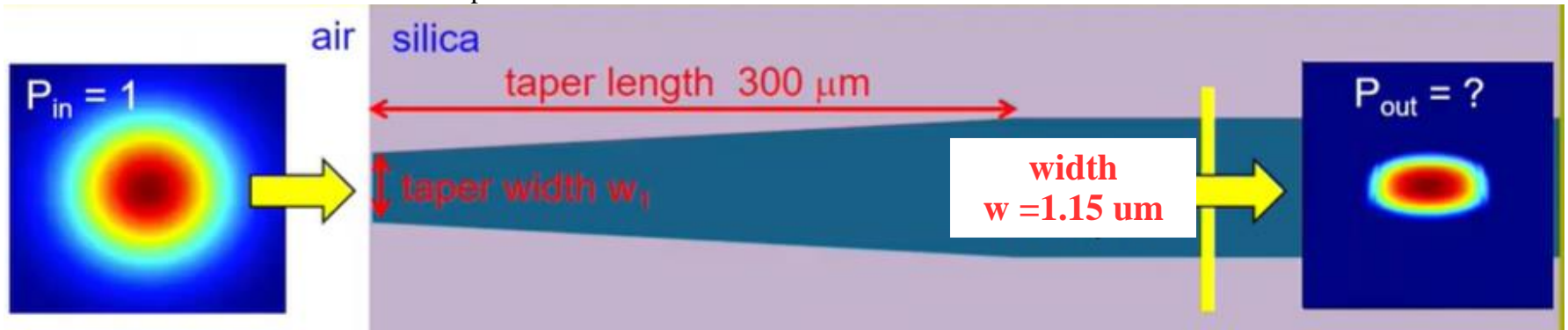
Efficiency ~ 16%

Transmission shift vs voltage



# Дизайн и моделирование работы оптической микросхемы

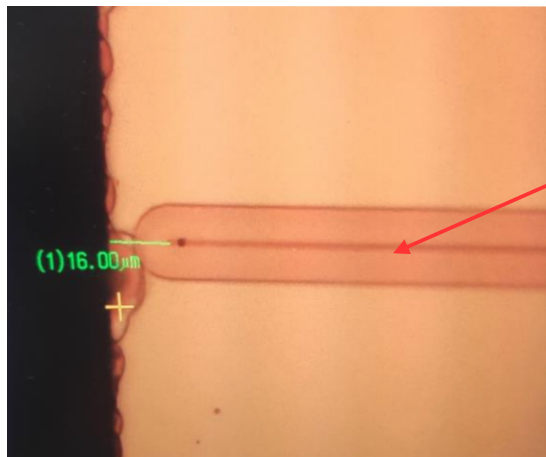
MFD<sub>SMF</sub> → MFD  
Taper



$$P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = 0.965$$

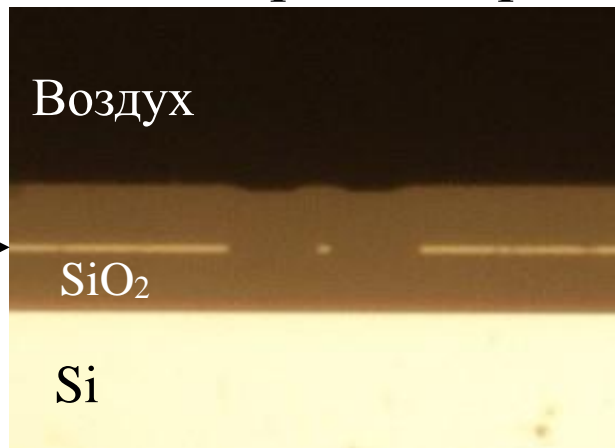
# Подготовка торцов оптической микросхемы

Резка алмазным

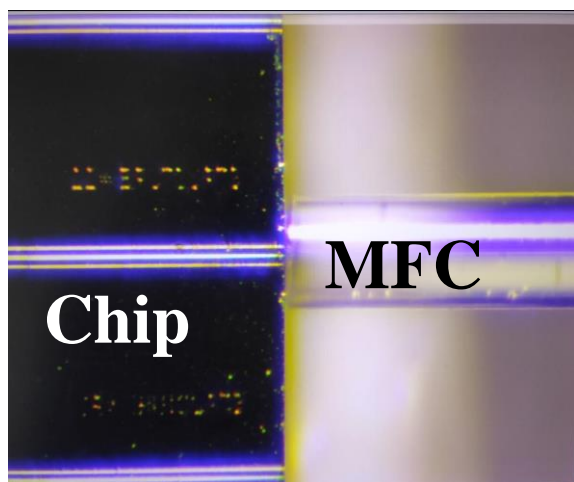


Шлифовка и полировка торца

Волновод

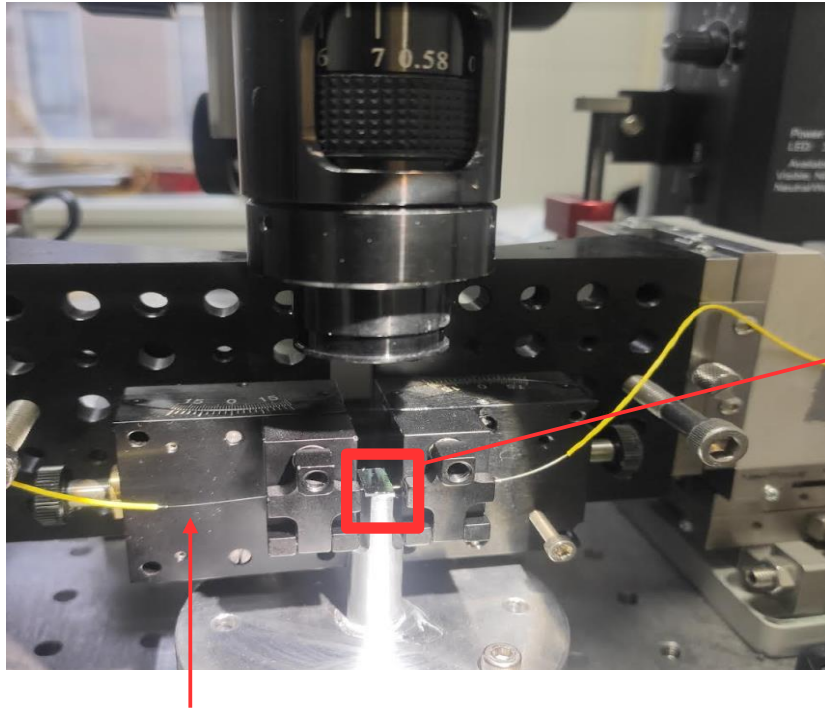


Изготовление Mode Field Converter - **0.1 — - 0.3 dB**

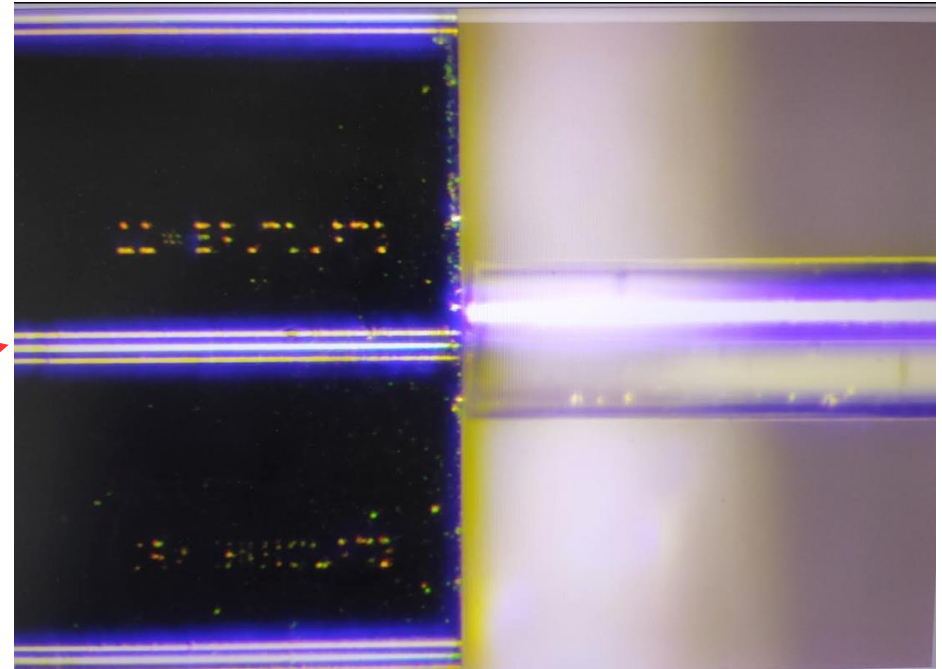


Тип оптоволокна	Диаметр моды волокна $\lambda =$ $1.55\mu\text{m}$
SMF	9.5 - $10\mu\text{m}$
UHNA	3.2- $4.8\mu\text{m}$

# Измерение параметров оптической микросхемы



SMF\_UHNA3  
оптоволокно  
-0.1 dB



Ввод/Вывод  $\eta = -7$  dB

# Терагерцовая фотоника

## Основные задачи:

### 1. Разработка перспективных технологий для беспроводных соединений в сетях 5/6G:

- ✓ антенные решения для БАЗОВОЙ СТАНЦИИ (БС) с управляемой направленностью излучения
- ✓ интеллектуальные элементы канала БС-АБОНЕНТ для маршрутизации беспроводного сигнала.

### 2. Создание ТГц спектральных приборов для медицины и хайтек индустрии:

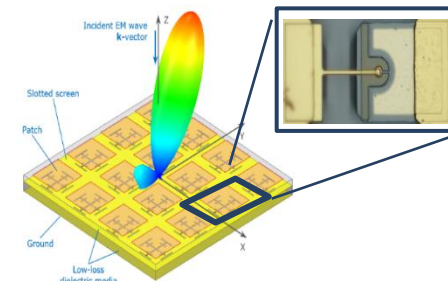
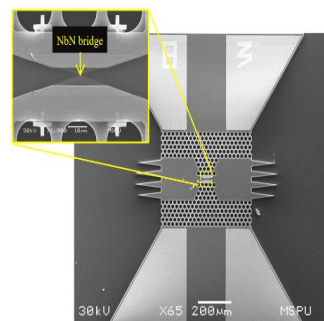
- ✓ спектрометры-на-чипе для анализа динамики изменений метаболизма человека при патологиях по сигнатуре ТГц линий
- ✓ ближнепольные ТГц сканеры со сверхразрешением

## Решения:

- ✓ Интегральные схемы на базе интегрированных Si фотонных кристаллов со сверх- и полу-проводниковыми нелинейными элементами
- ✓ Сочетание фотонных и электронных методов
- ✓ Управление оптическими свойствами интегральной схемы путем контроля токов в нелинейных элементах на диэлектрике

Интеллектуальный ТГц отражатель

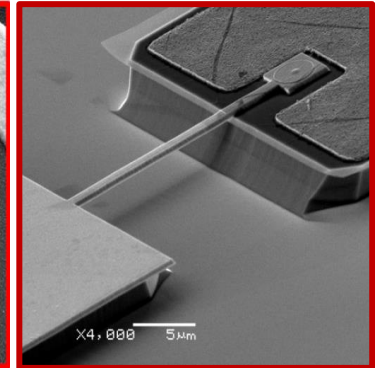
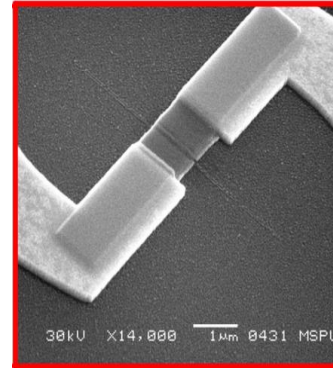
ТГц смеситель на SOI



# Терагерцовая фотоника: элементы и устройства

## 1. Нелинейные элементы на основе НЕВ и диодов Шоттки

- ✓ Легко интегрируются с согласующими щелевыми линиями на ТГц Si фотонном кристалле
- ✓ Обеспечивают сверхвысокую чувствительность при обработке ТГц сигнала в жидком гелии и комнате



## 2. Устройства на основе интегрированных Si фотонных кристаллов

- ✓ Si фотонные кристаллы для волноводов со сверхнизкими потерями (0,02 дБ/мм на 150 ГГц)
- ✓ Штыревые антенны с симметричным пучком для торцевого ввода излучения (коэф. усиления 14дБ)
- ✓ Эффективное согласование НЕВ с ТГц Si фотонным кристаллом (-2дБ по сигналу и -7дБ по гетеродину)
- ✓ Использование деления/суммирования мощности на основе многомодовой самоинтерференции
- ✓ Использование антенной решетки для управления диаграммой направленности
- ✓ Возможность фильтрации сигнала в фотонных линиях

