

## Кремниевая интегральная фотоника

В.П. Драчев

АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий» Сколтех

Лаборатория Плазмоники

Центр Инженерной Физики

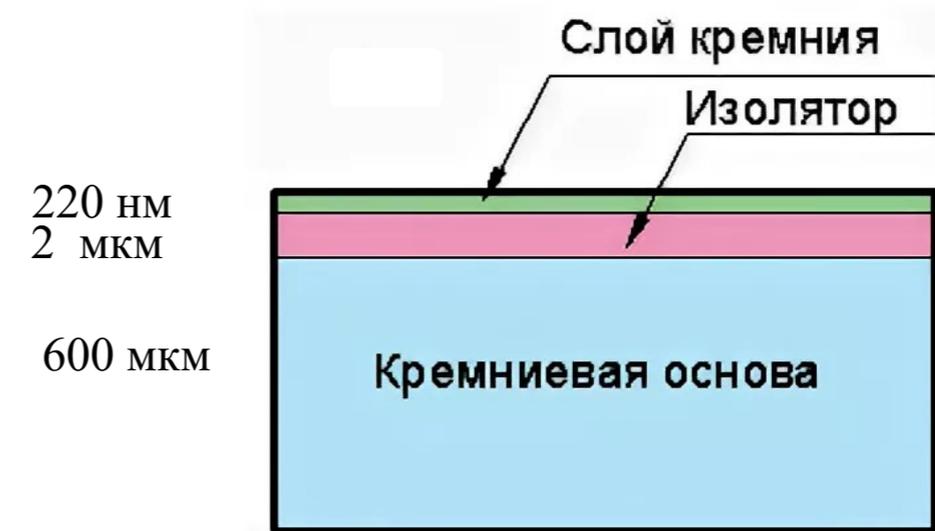
Грант РФФ № 23-91-06301

Мегагрант РФФ № 25-72-31023

# План на сегодня

1. Введение: Кремниевые технологии  
(КМОП – комплиментарная структура металл /оксид/полупроводник)
2. Некоторые цели кремниевой интегральной фотоники
  - Фотонные АЦП
  - Si-плазмонный детектор на внутренней фотоэмиссии  
Оптико-ТГц преобразователь
3. Лаборатория Плазмоники Сколтеха, технологии и проекты
4. **Малозумящий автогенератор СВЧ диапазона с обратной связью через электро-оптический модулятор**  
Совместно с группой Устинова А.Б. - ЛЭТИ
5. **Интегральные лазерные генераторы высокой когерентности**  
Сколтех, Центр Инженерной Физики, рук. Драчев В.П.  
Ульяновский Гос. Университет, рук. Фотиади А.А.  
МИЭТ, рук. Лазаренко П.И., МИСИС Ковалюк В.В.  
НИИ “Полюс” имени М. Ф. Стельмаха” рук. Ладугин М.А.  
НПК «Технологический центр», директор Светухин В.В.

## Наша платформа Кремний на изоляторе (КНИ)



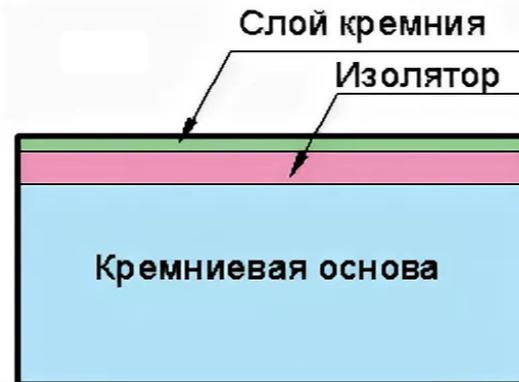
# Кремниевые технологии

## Кремний на изоляторе (КНИ)

Гибридные сборки ФИС с лазером и приемниками

Модуляторы

Волноводы  
Микро-кольцевые резонаторы  
Упорядоченные Волноводные  
Решетки (УВР)  
Решетки ввода вывода  
Обратные тейперы



Гибридная сборка  
КНИ и Полупроводниковый  
Оптический Усилитель

Единая платформа для  
фотонных и электронных  
схем  
Co-Packaged Optics (CPO) –  
новый тип технологии опто-  
электронной интеграции

Гетерогенные технологии  
Si – A3-B5

## Фундаментальные ограничения электронных АЦП

Тепловой шум

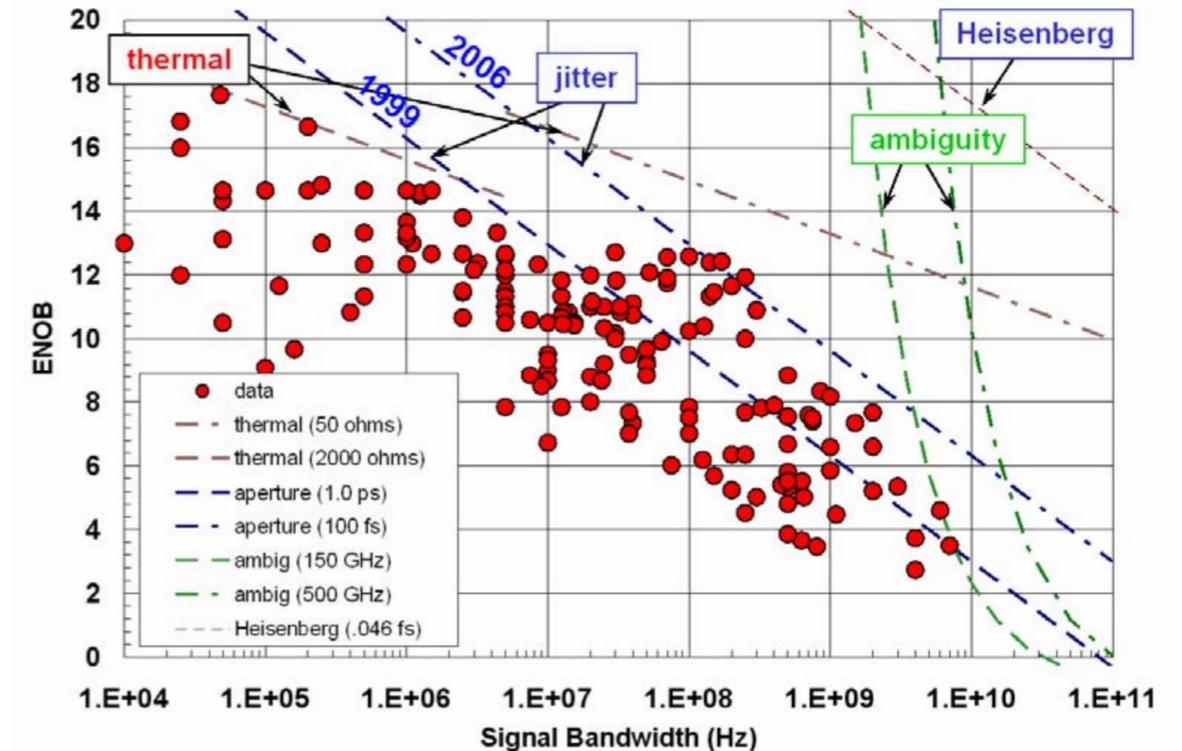
Джиттер — это отклонение от истинной периодичности.

Неопределенность компараторов: конечная скорость, с которой транзисторы в компараторах способны реагировать на напряжение.

**Эффективное число бит (ENOB):**

мера реального **динамического диапазона** аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

**Теорема Котельникова:** Если аналоговый сигнал имеет ограниченный по ширине спектр, то он может быть однозначно восстановлен по его дискретным отсчётам, взятым на **частоте, строго превышающей удвоенную верхнюю частоту.**



Signal frequency Bandwidth

5 March 2007 / Vol. 15, No. 5 / OPTICS EXPRESS 1955

R. Walden, "Analog-to-digital conversion in the early twenty-first century," in Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, (Wiley, 2008), pp. 126–138.

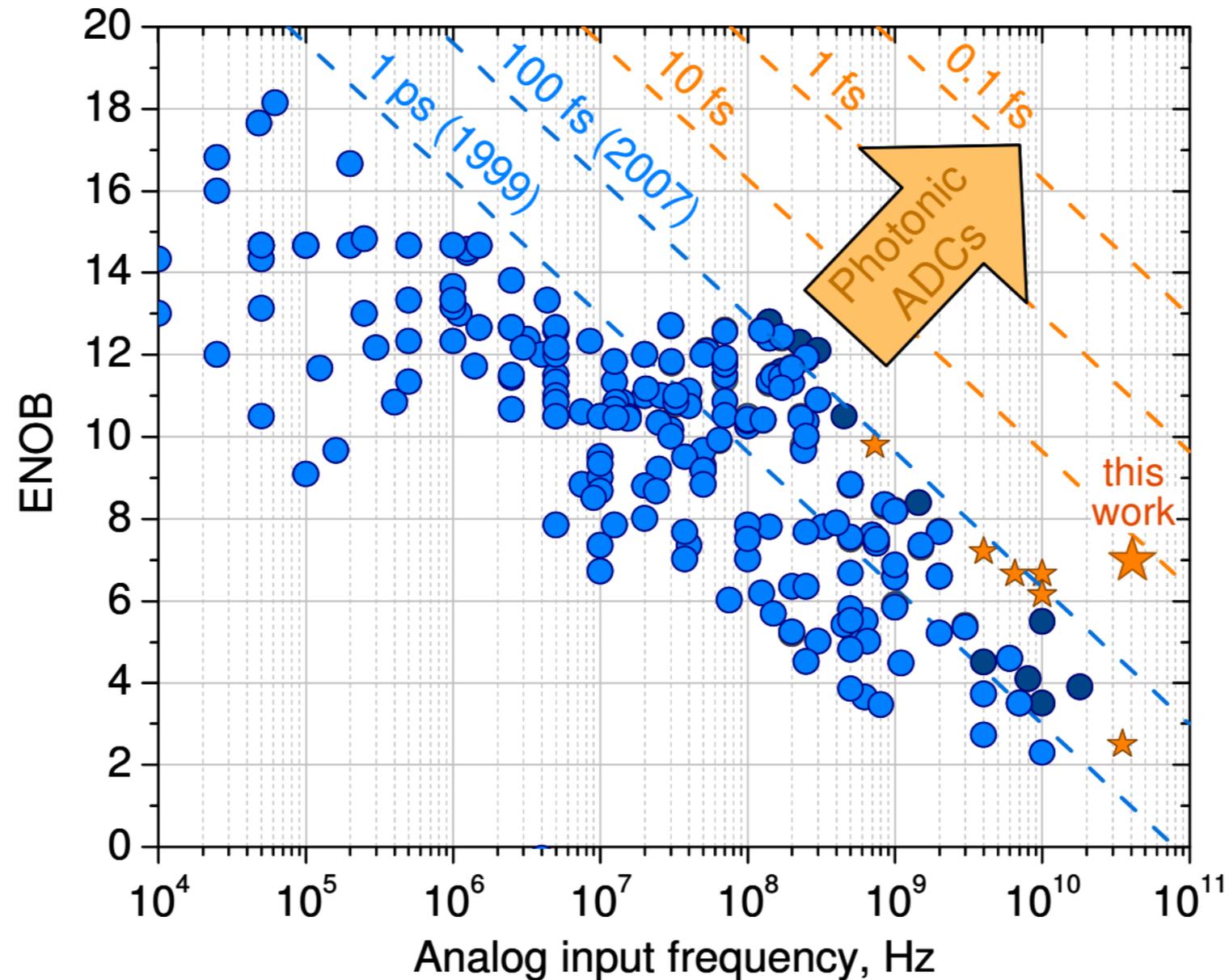
# Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter

A. Khilo, ....., F. X. Kärtner

MIT, Lincoln Lab MIT, DESY & University of Hamburg, INTEL Labs,

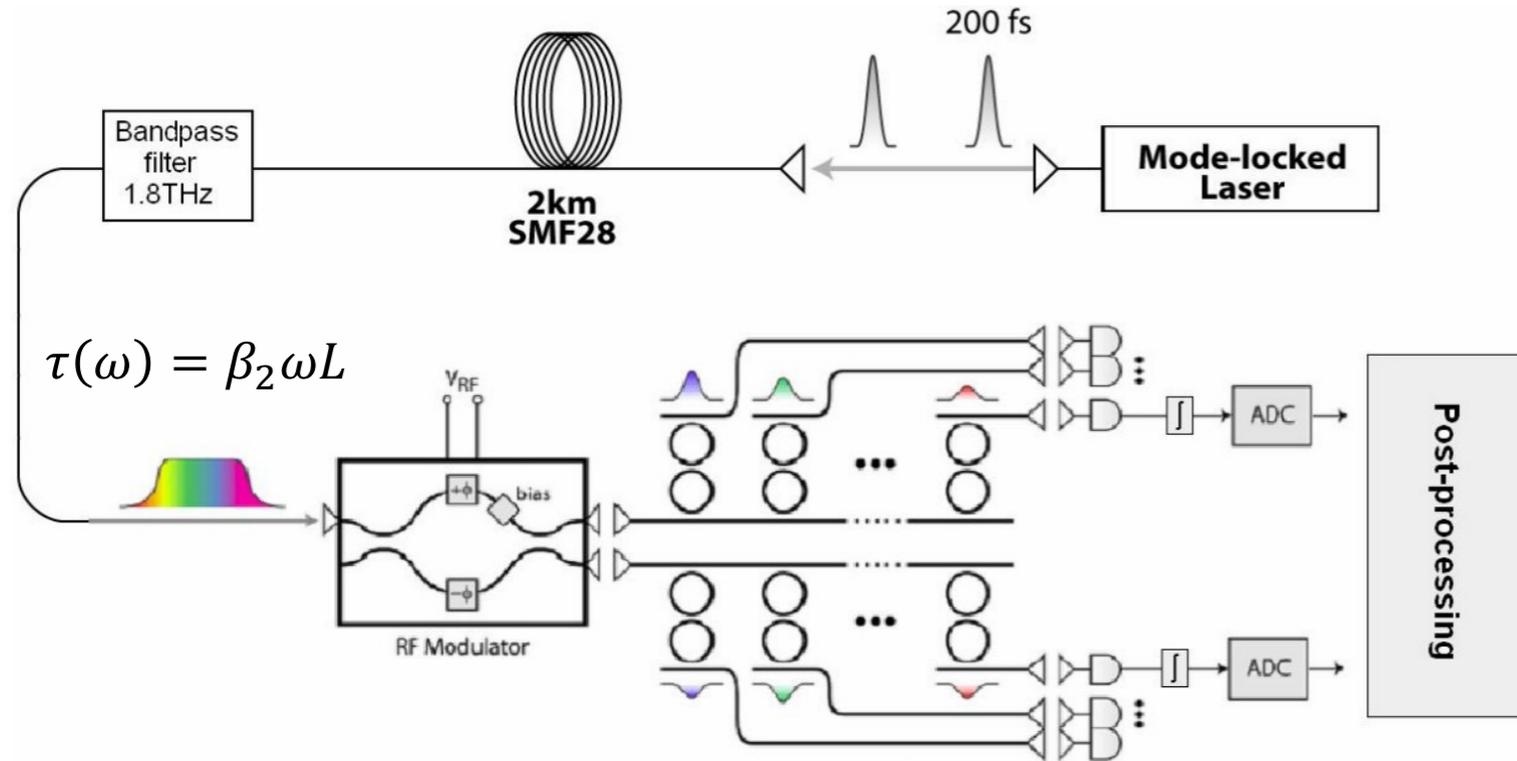
Samsung Electronics, Masdar Institute of Science and technology, Colorado University, Synopsis Inc. Pasadena

2012 / Vol. 20, No. 4 / OPTICS EXPRESS 4464



# 1

# Фотонные приставки АЦП на интегральной платформе



$$\beta_2 L 2\pi \Delta f N = T_R$$

Пример 2:

Table 1: Summary of system parameters for overall sampling rates of 40 or 100 GSa/sec.

Overall Sampling Rate $f_s = 1/T_s$	Laser Rep. Rate $f_R = 1/T_R$	Filter Bandwidth	Channel Spacing $\Delta f$	Number of Filters $N$	Total Optical Bandwidth	Resolution $\Delta V/V$	Max. Jitter $\Delta t$	Center Frequency Precision
40 GSa/sec	2 GHz	25 GHz	80 GHz	20	1.6 THz	8 bit	30 fs	100 MHz
100 GSa/sec	2 GHz	25 GHz	80 GHz	50	4.0 THz	10 bit	3 fs	10 MHz

Photonic Analog-to-Digital Conversion with Electronic-Photonic Integrated Circuits

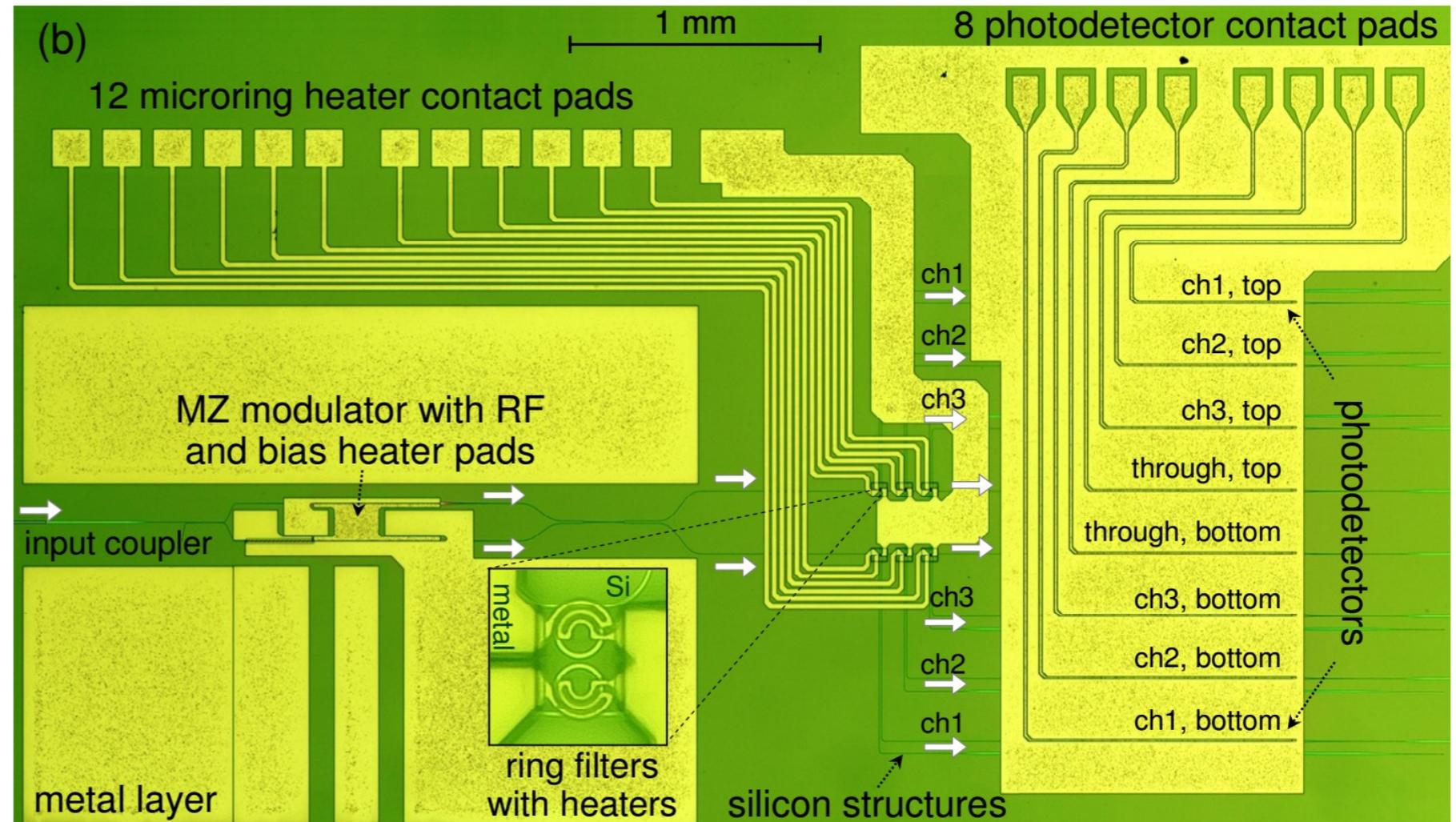
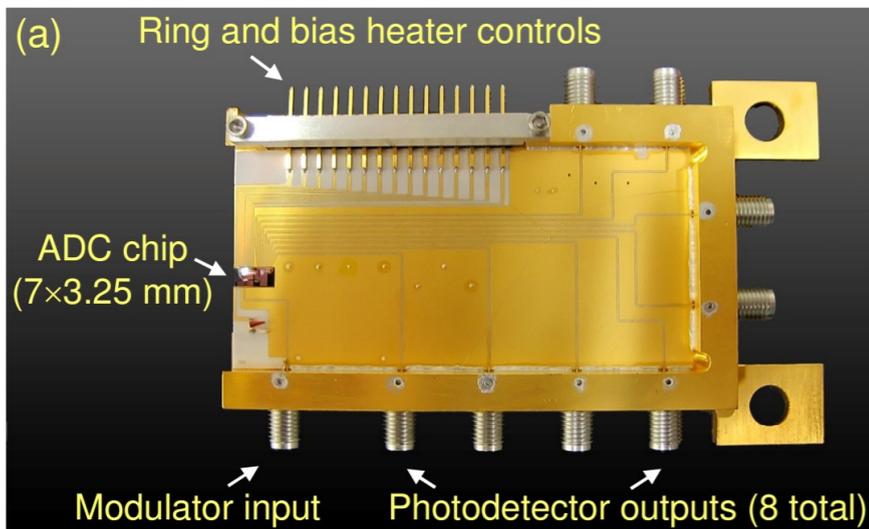
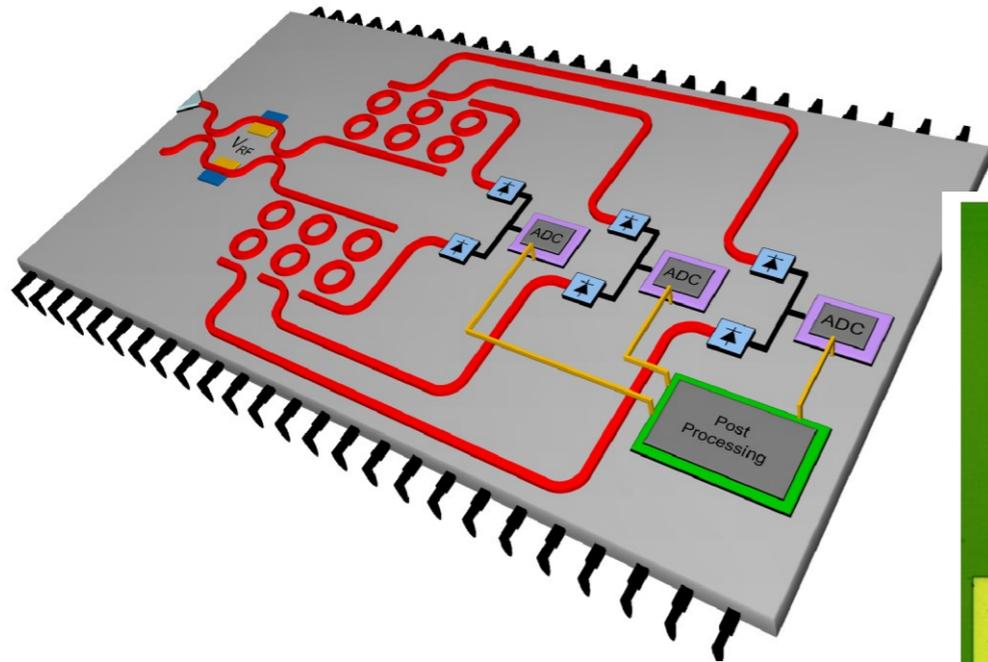
Proc. of SPIE Vol. 6898 689806-1 2014

A. Khilo, ....., F. X. Kärtner  
 MIT, Lincoln Lab MIT,  
 DESY & University of Hamburg,  
 INTEL Labs,  
 Samsung Electronics,  
 Masdar Institute of Science and technology,  
 Colorado University, Synopsis Inc.  
 Pasadena

# Фотонные приставки АЦП

A. Khilo, ....., F. X. Kärtner et.al

2012 / Vol. 20, No. 4 / OPTICS EXPRESS 4464





# Si-плазмонный детектор на внутренней фотоэмиссии Опико-ТГц преобразователь

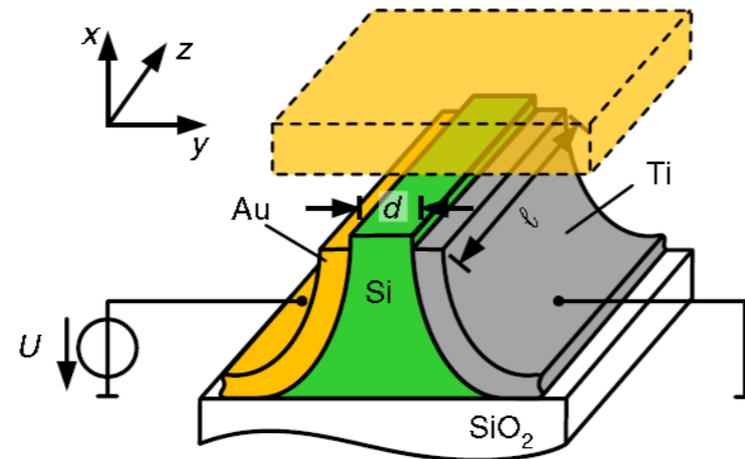
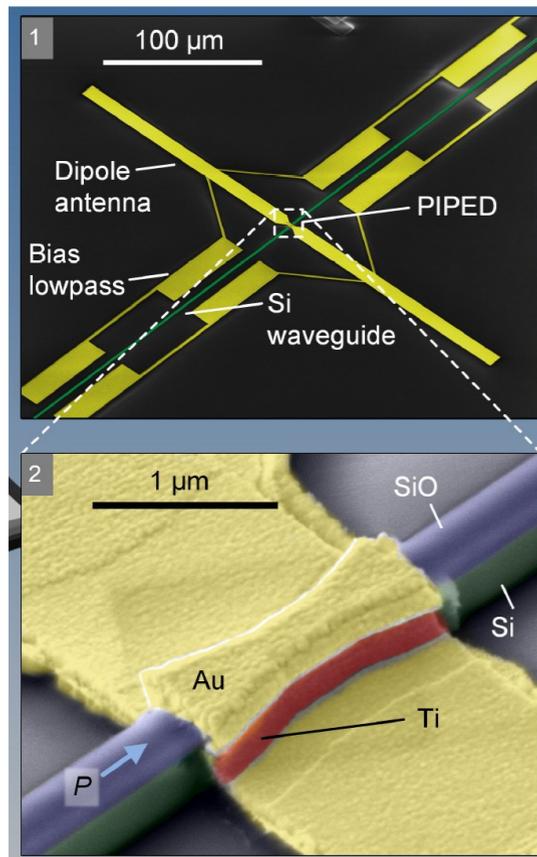
NATURE PHOTONICS | VOL 12 | OCTOBER 2018 | 625-633 | [www.nature.com/naturephotonics](http://www.nature.com/naturephotonics)

## Silicon-plasmonic integrated circuits for terahertz signal generation and coherent detection

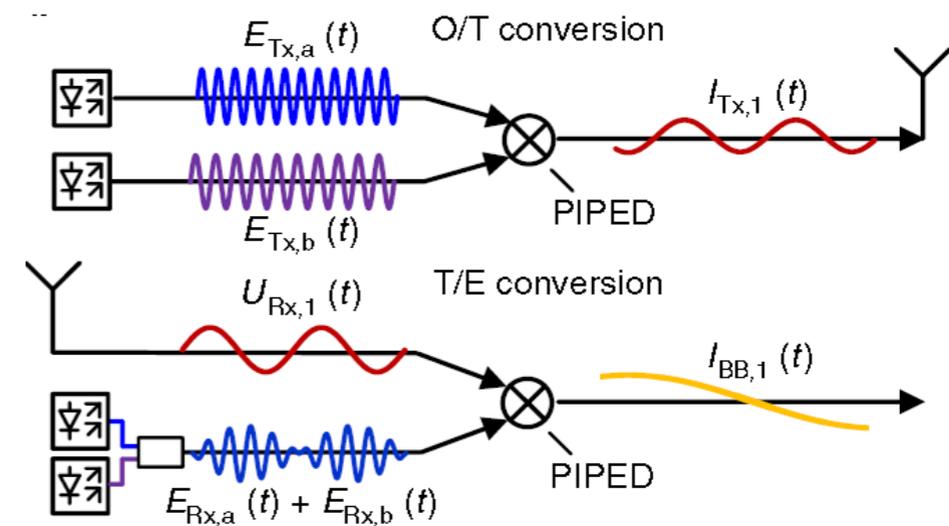
T. Harter<sup>1,2\*</sup>, S. Muehlbrandt<sup>1,2</sup>, S. Ummethala<sup>1,2</sup>, A. Schmid<sup>1</sup>, L. Hahn<sup>2</sup>, W. Freude<sup>1</sup>, C. Koos<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Photonics and Quantum Electronics (IPQ), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany

<sup>2</sup>Institute of Microstructure Technology (IMT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany



### THz O/T and T/E conversion review

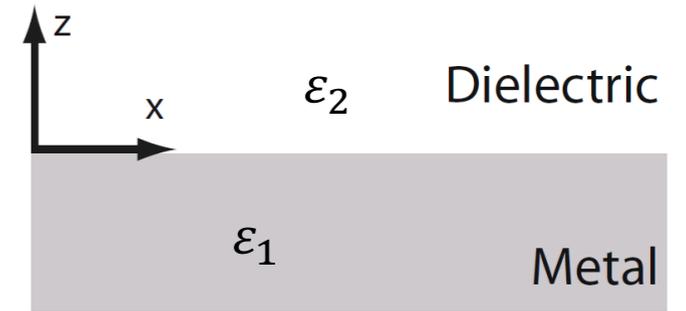


# Плазмон-поляритоны

TM мода:

$$z > 0 \quad H_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z}$$

$$z < 0 \quad H_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z}$$



Длина волны плазмона  $\lambda_{SPP} = \frac{2\pi}{\beta'}$

Длина распространения по интенсивности  $1/(2\beta'')$

Диэлектрическая  
проницаемость

Ag ( $\epsilon_1 = -18.2 + 0.5i$ )

Au ( $\epsilon_1 = -11.6 + 1.2i$ )

@ 633 нм.

$$\beta' \approx \sqrt{\frac{\epsilon_1' \epsilon_2}{\epsilon_1' + \epsilon_2}} \frac{\omega}{c},$$

$$\beta'' \approx \sqrt{\frac{\epsilon_1' \epsilon_2}{\epsilon_1' + \epsilon_2}} \frac{\epsilon_1'' \epsilon_2}{2\epsilon_1'(\epsilon_1' + \epsilon_2)} \frac{\omega}{c},$$

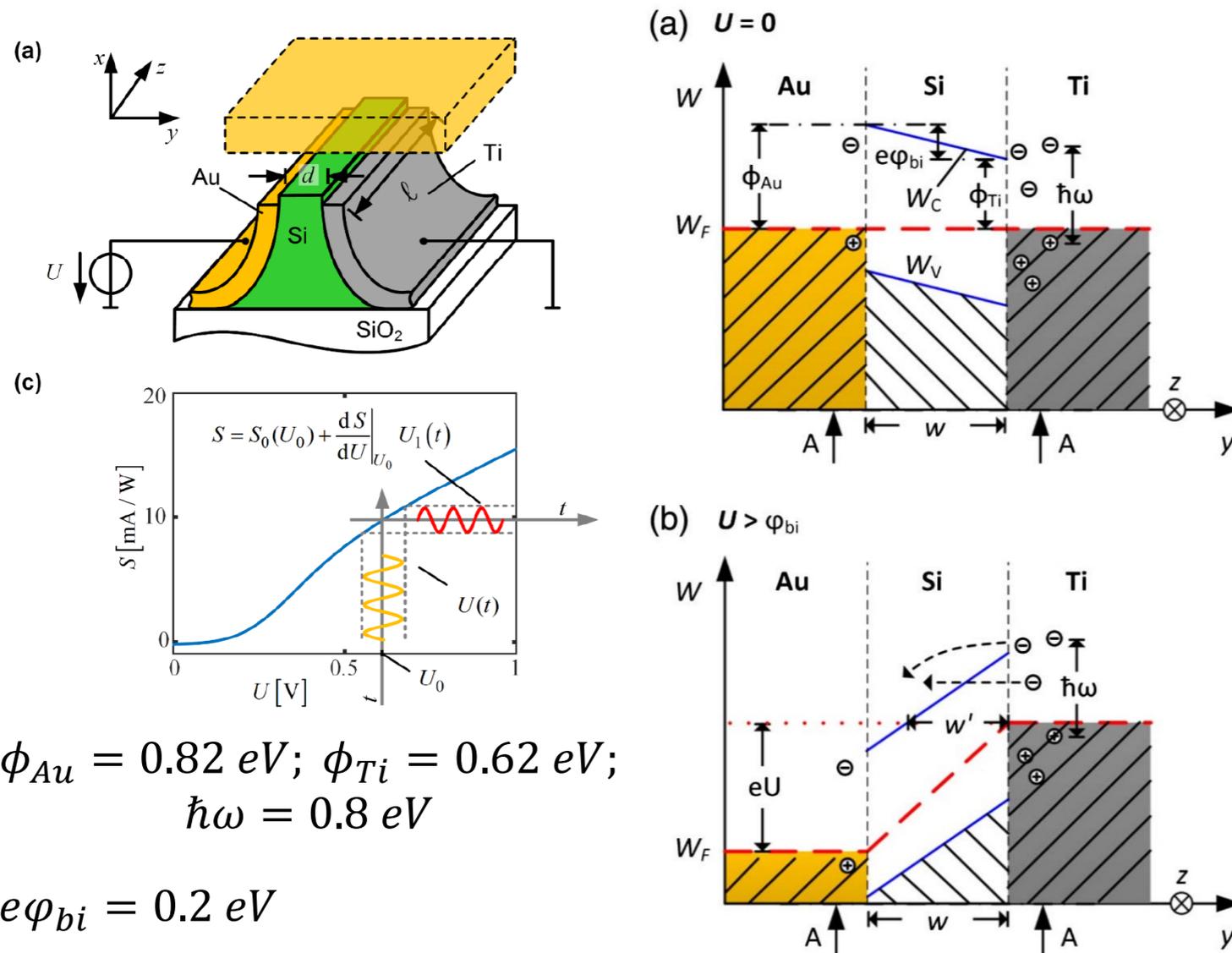
$$k_{1,z} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1'^2}{\epsilon_1' + \epsilon_2}} \left[ 1 + i \frac{\epsilon_1''}{2\epsilon_1'} \right],$$

$$k_{2,z} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1' + \epsilon_2}} \left[ 1 - i \frac{\epsilon_1''}{2(\epsilon_1' + \epsilon_2)} \right].$$

Условие возбуждения плазмон  
поляритона на границе  
 $\epsilon_1' + \epsilon_2 < 0; \epsilon_1' \epsilon_2 < 0.$

# Si-плазмонный детектор на внутренней фотоэмиссии

NATURE PHOTONICS | VOL 12 | OCTOBER 2018 | 625-633 | [www.nature.com/naturephotonics](http://www.nature.com/naturephotonics)

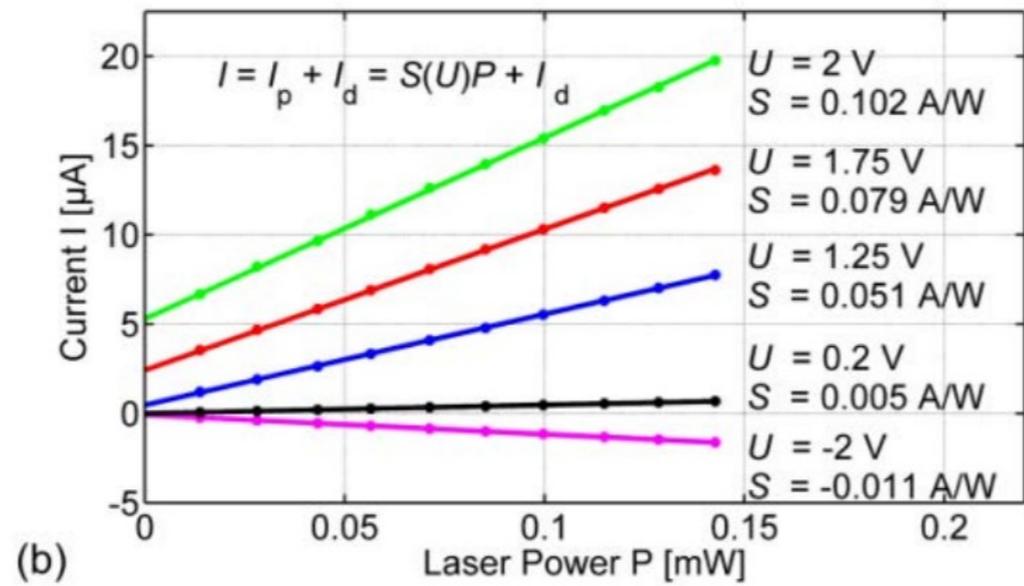
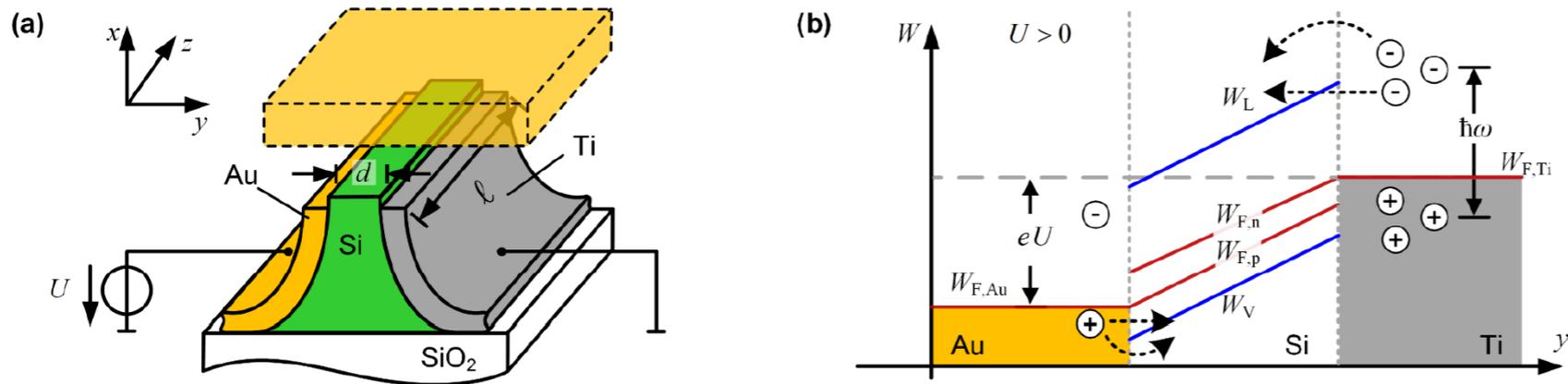


Выводы:

- Ключевые физические процессы:
  - Плазмоны в течение 10 фс распадаются на одноэлектронные возбуждения, резонансные и нерезонансные.
  - Резонансные -- живут около 500 фс.
  - Термолизация и передача энергии матрицу -- 1 пс.
  - Использование барьера Шотки сформированного на Si волноводе для быстрого фотодетектора.
- Кремниевая технология применима для реализации гибридных плазмон-поляритонных ТГц фотонных интегральных схем.

# Si-плазмонный детектор на внутренней фотоэмиссии

NATURE PHOTONICS | VOL 12 | OCTOBER 2018 | 625-633 | [www.nature.com/naturephotonics](http://www.nature.com/naturephotonics)



## Выводы:

- Ключевые физические процессы:
  - Плазмоны в течение 10 фс распадаются на одноэлектронные возбуждения, резонансные и нерезонансные.
  - Резонансные-- живут около 500 фс.
  - Термолизация и передача энергии матрицу -- 1 пс.
  - Использование барьера Шотки сформированного на Si волноводе для быстрого фотодетектора.
- Кремниевая технология применима для реализации гибридных плазмон-поляритонных ТГц фотонных интегральных схем.

Интегральные схемы и устройства



Электронная литография, Индукционно связанное плазменное травление

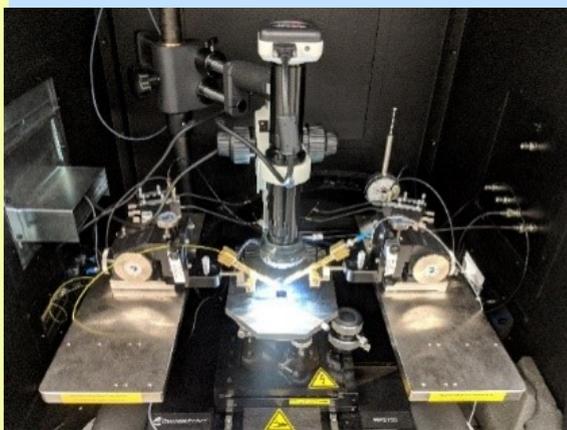
Разработка интегральных схем и устройств для применений в наноэлектронике, сенсорике, плазмонике, фотонике и нанобиомедицине.

Изготовление



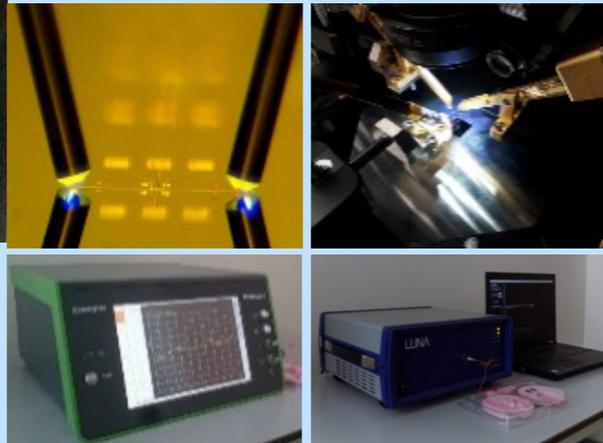
Электронно-лучевая установка напыления металлов и диэлектриков Angstrom Nexdep

Кремниевая нанофотоника и плазмоника



Оптические и СВЧ измерения

Зондовая станция с параметрическим векторным анализатором и оптическим анализатором спектра

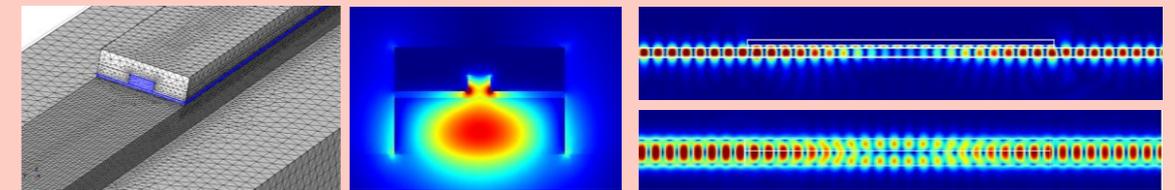


Высокопроизводительные расчеты



Численное моделирование

Высокопроизводительное 3D моделирование оптических и электрических процессов в наноструктурах. Передовые алгоритмы параллельных вычислений с использованием HPC вычислительных кластеров Сколтеха.



# Центр Инженерной Физики

## Лаборатория Плазмоники



Владимир  
Драчев,  
д.ф.-м.н.,  
Профессор,  
Руководитель



Сергей  
Косолюбов,  
д.ф.-м.н.,  
Профессор



Денис Жигунов,  
к.ф.-м.н.,  
Ведущий  
научный  
сотрудник



Иван  
Пшеничнюк,  
Ph.D.  
Ведущий  
научный  
сотрудник



Константин  
Гарбузов,  
Инженер-  
исследователь



Анастасия  
Земцова,  
Младший  
научный  
сотрудник



Даниил Земцов,  
К.ф.-м.н.  
Научный  
сотрудник



Александр  
Смирнов,  
Инженер  
исследователь



Мария Погодаева,  
М.н.с.



Камиль  
Тазиев,  
Аспирант



Диана  
Шимловская,  
Магистрант



Андрей Целин,  
Аспирант



Лиза Кожина,  
М.н.с.



Сергей Бедин,  
К.ф.-м.н.  
Старший Научный  
сотрудник

# Проектирование и изготовление фотонных интегральных схем (ФИС) и устройств

## Кремний На Изоляторе

### Публикации по теме:

*Phys. Rev. B* 100 (19), (2019).  
*RF patent* 2021125699/28(054303).  
*Applied Sciences* 9 (22), 4834, 2019.  
*Physical Review B* 103 (11), 115404, 2021.  
*Physical Review Applied* 16 (4), 044054, 2021.  
*Physical Review B* 103 (16), Letter 161404, 2021.  
*Optics Letters* 47, (13), 3339-3342, 2022.  
*Physical Review B* 107 (4), 045113, 2023.  
*Computer Optics* 47 (2), 224-229, 2023.  
*Journal of Lightwave Technology* (2023).  
*Physical review B* 109, 035401 (2024).  
УФН 194 1223–1239 (2024)

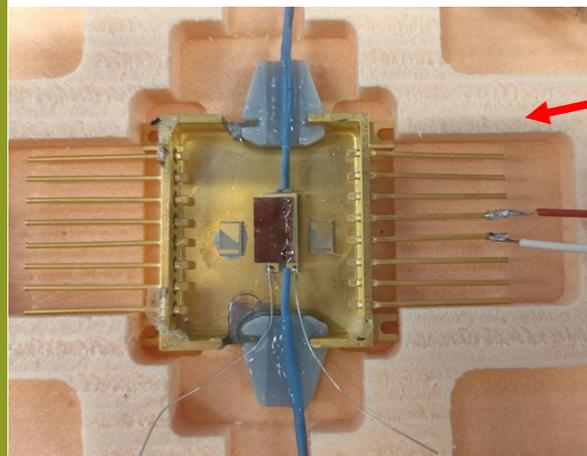
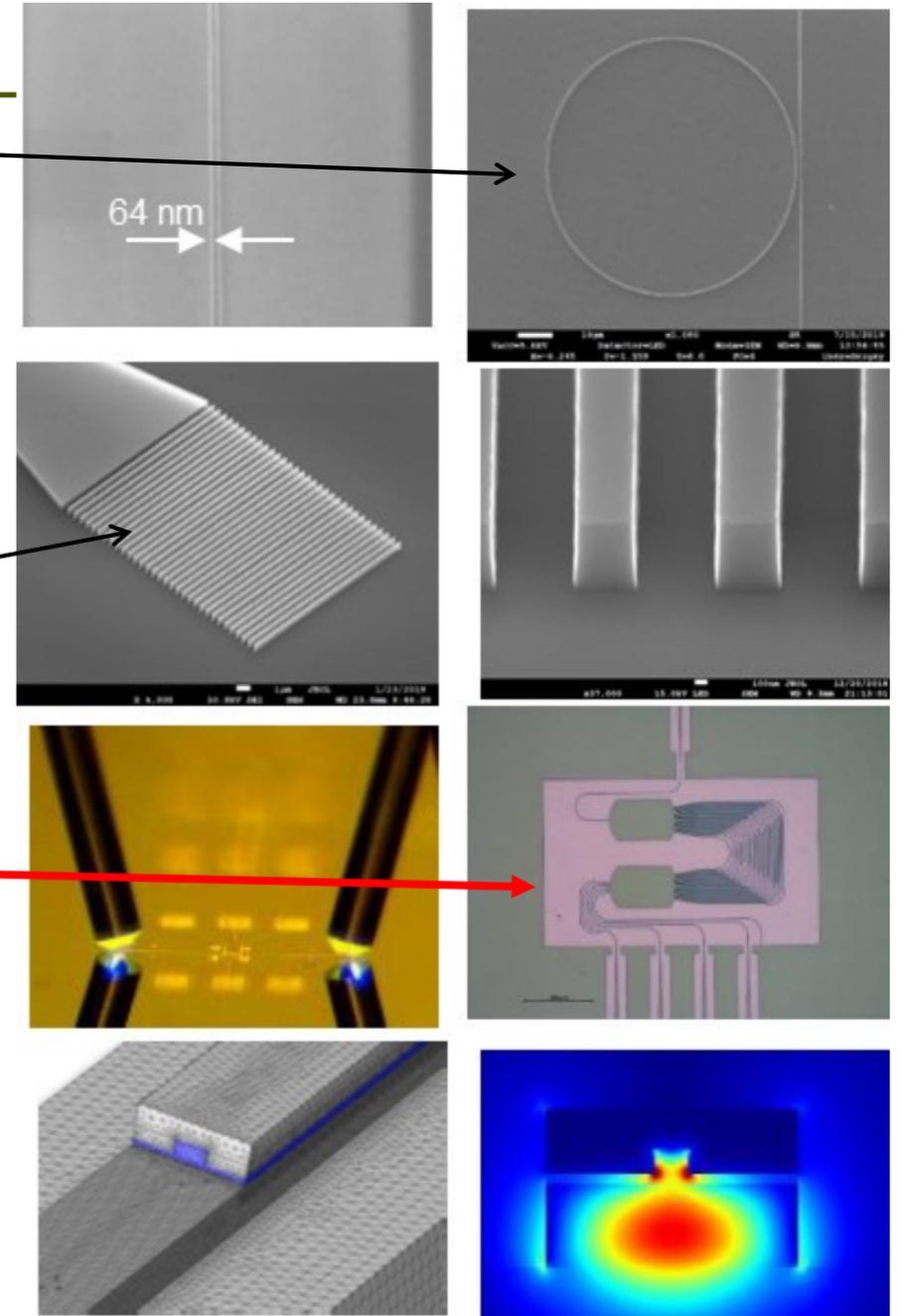
### Основные компетенции

- Замкнутый цикл в одной лаборатории:
- Численное моделирование ФИС, разработка и изготовление ФИС методами электронно-лучевой литографии. Оптические и радиочастотные измерения.

Добротность  $>10^6$   
Резкость  $>100$   
Контраст  $>30$  дБ

### Ключевые результаты:

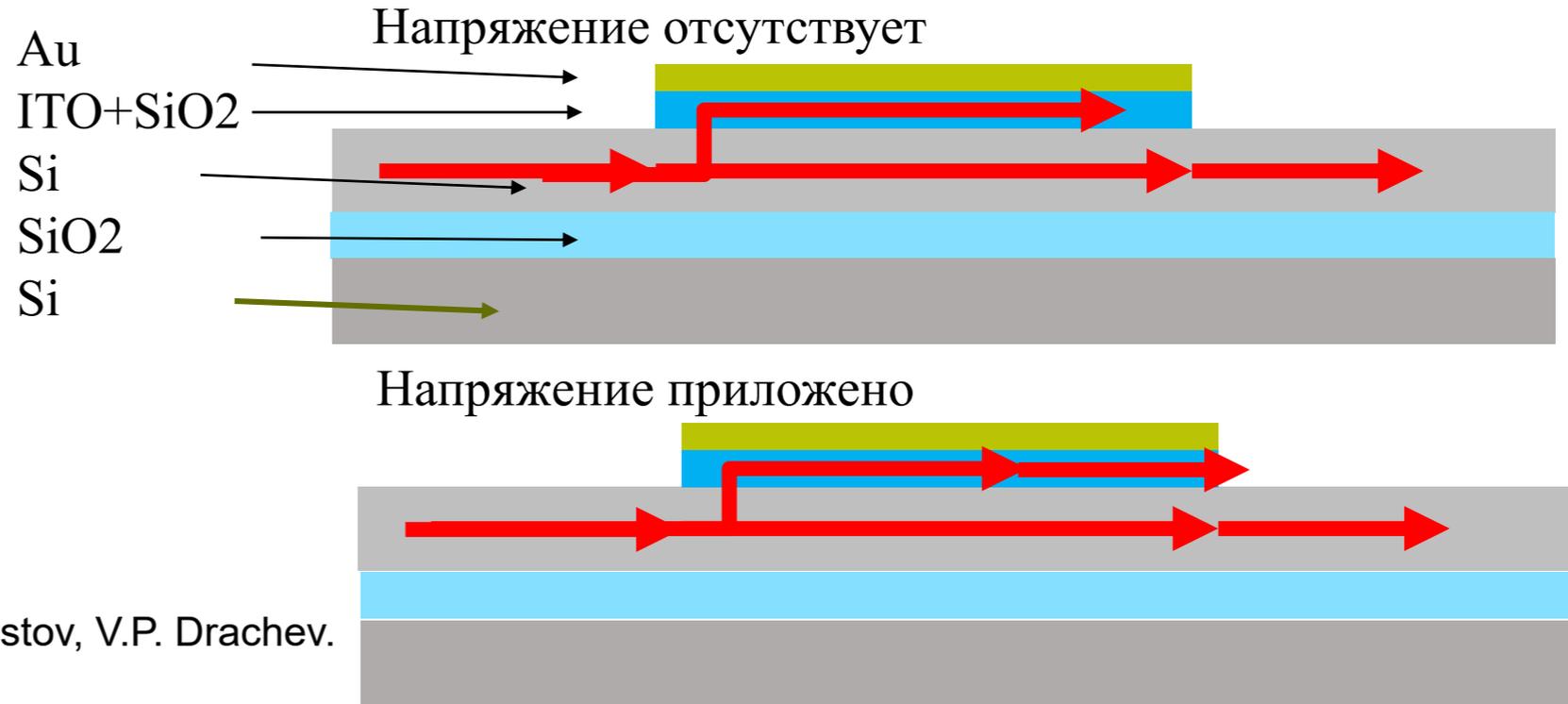
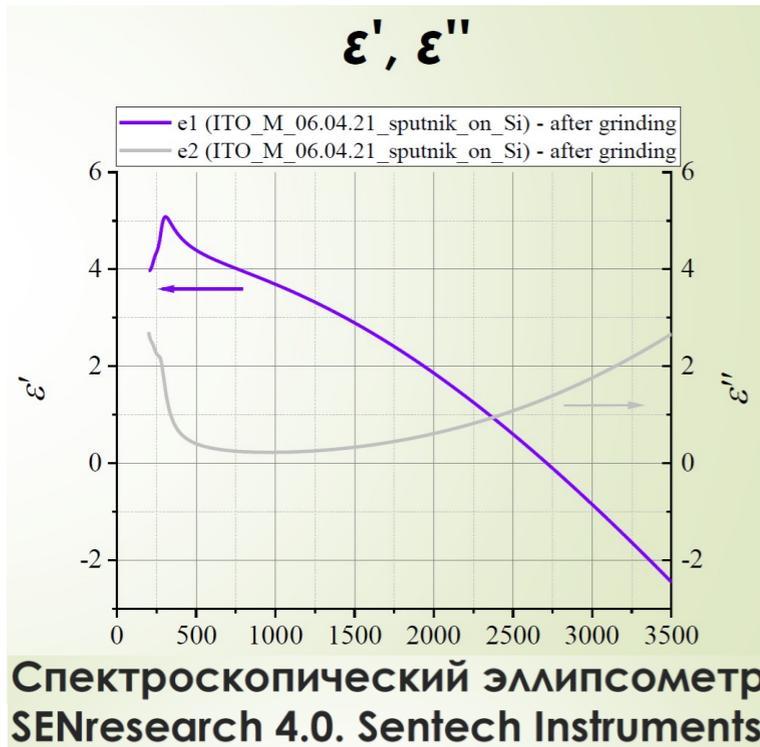
- Рекордная эффективность ввода-вывода оптического излучения дифракционной решеткой на уровне -1 дБ для широкого диапазона  $\sim 70$  нм.
- Прототип интегрального микроспектрометра для сенсоров на волоконных брэгговских решетках ВБР. Для **Инверсия сенсор, Пермь**
- Прототип сверхвысокочастотного электрооптического плазмонного модулятора с полосой пропускания до 40 ГГц



➤ Модуляторы на Кремнии На Изоляторе с полосой частот 40 ГГц+ на основе дисперсии свободных электронов (плазмоны) управляемой электрическим полем

Диэлектрическая проницаемость оксида индия – олова ITO, реальная  $\epsilon'$  и мнимая  $\epsilon''$ ,  $\epsilon_2$  – диэлектрик

Принцип действия



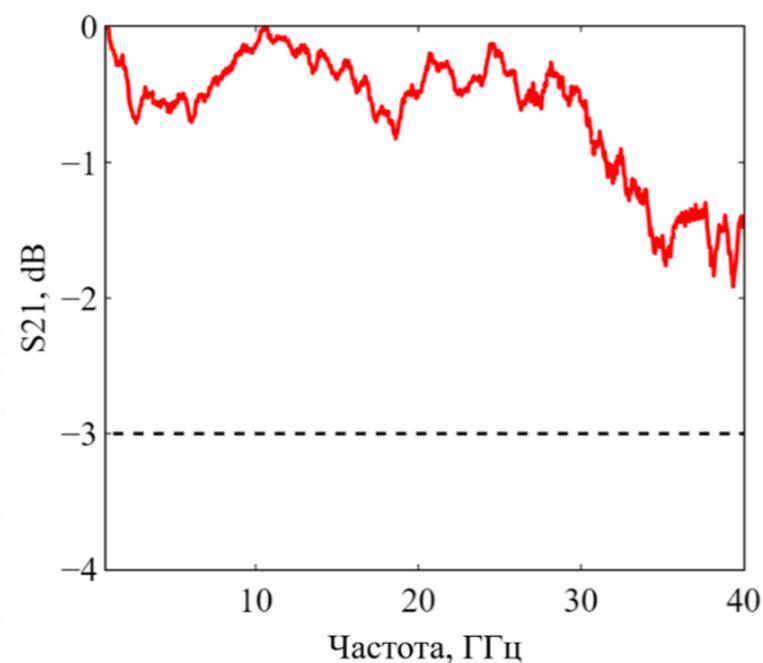
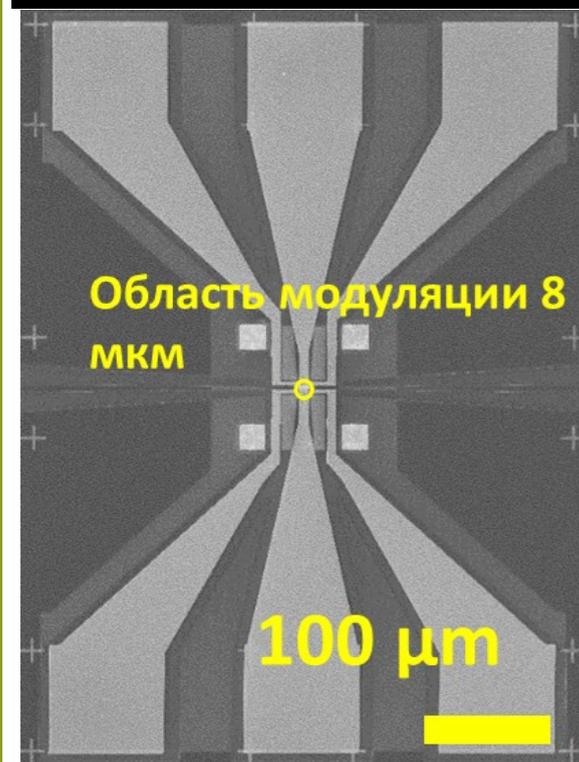
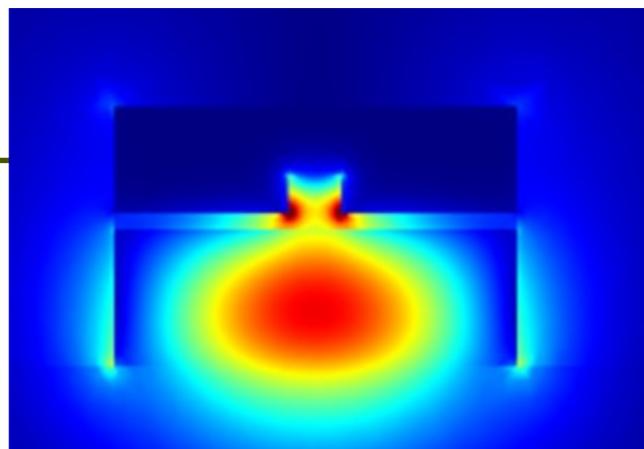
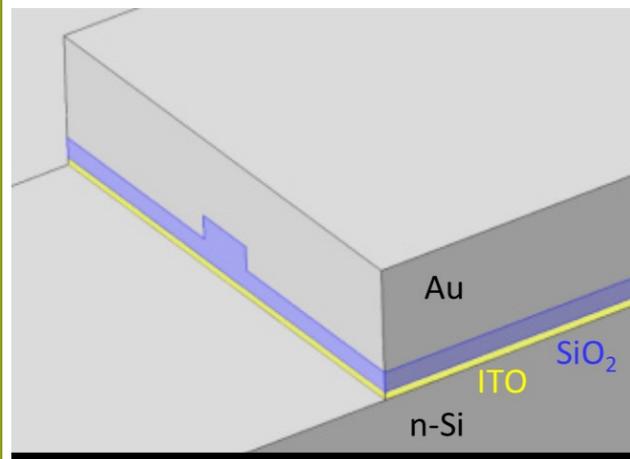
Условие возбуждения плазмон поляритонов на границе  $\epsilon'_1 + \epsilon_2 < 0; \epsilon'_1 \epsilon_2 < 0$ .

I.A. Pshenichnyuk, G.I. Nazarikov, S.S. Kosolobov, A.I. Maimistov, V.P. Drachev.

Edge-plasmon assisted electro-optical modulator.

Phys. Rev. B 100 (19), (2019).

Получен патент РФ №2775997

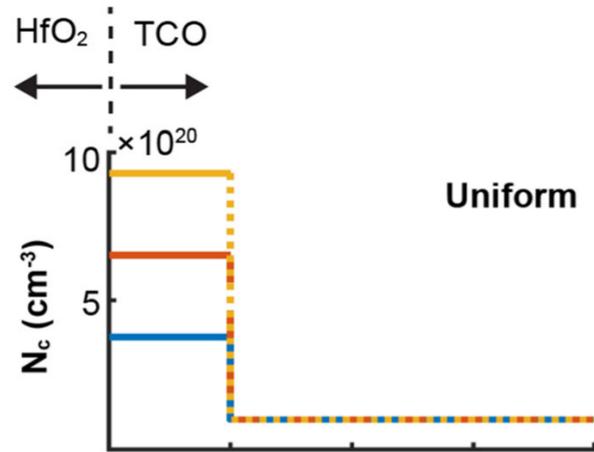


## Si-ITO интегральный электро-оптический модулятор

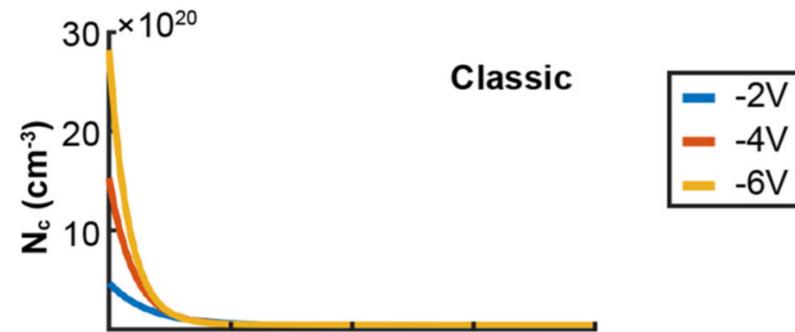
1. Экстинкция модулятора **2 дБ (3,6)** при -3 – +2 В.
2. Полоса модуляции **40+ ГГц** по -2 дБ, (5ГГц).
3. Уровень оптических потерь модулятора **4 дБ** (без учета ввода/вывода).
4. Длина активной области **8 мкм** для СВЧ модуляции.
5. Высокая линейность без контроля рабочей точки. Измерены интермодуляционные искажения ИМИ2 (56,3 дБ/Гц<sup>1/2</sup>) и ИМИ3 (57,3 дБ/Гц<sup>2/3</sup>).
6. DC экстинкция **10 дБ электро-хромизм**

D.S. Zemtsov, I.A. Pshenichnyuk, S.S. Kosolobov, A.K. Zemtsova, D.M. Zhigunov, A.S. Smirnov, K.N. Garbuzov, V.P. Drachev, «Plasmon-assisted Si-ITO integrated electro-optical rib-shape modulator», J. of Lightwave Technology 14, 6310-6314 (2023); **патент РФ №2775997**

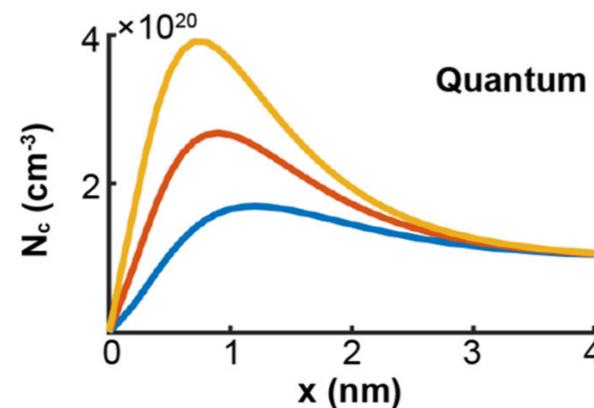
# Аккумулятивный заряд в оксиде индия олова на границе с диэлектриком: три модели



Сравнение трех моделей  
Однородное распределение заряда



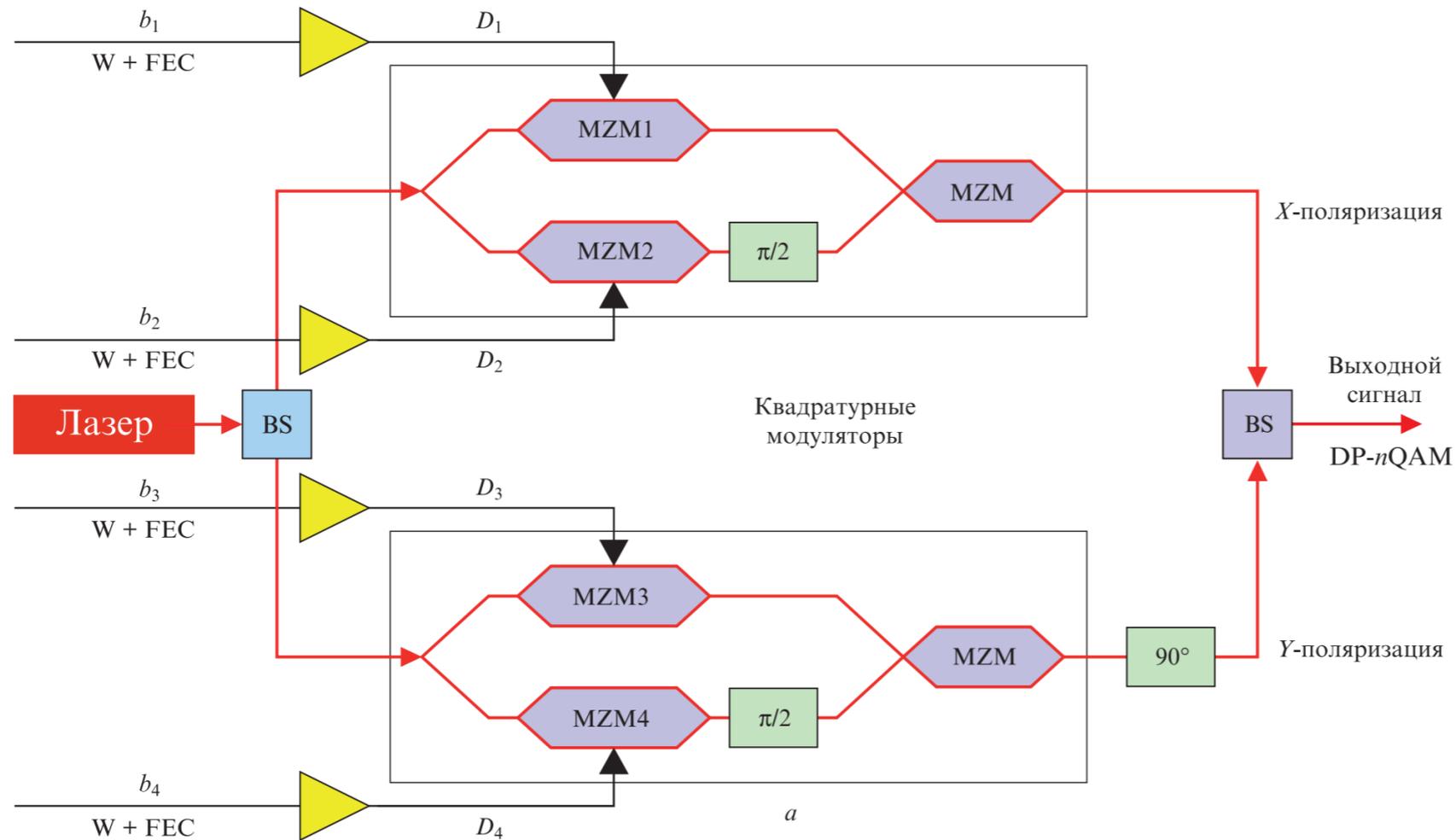
Сравнение трех моделей  
Классическая модель распределение заряда



Сравнение трех моделей  
Квантовая модель

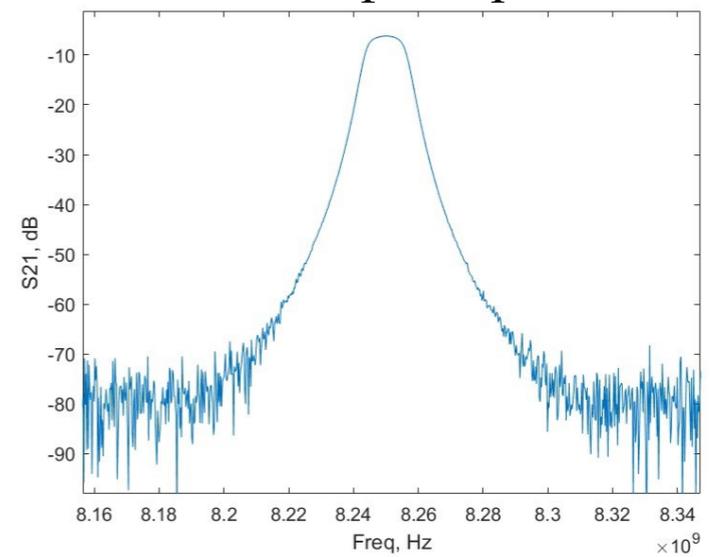
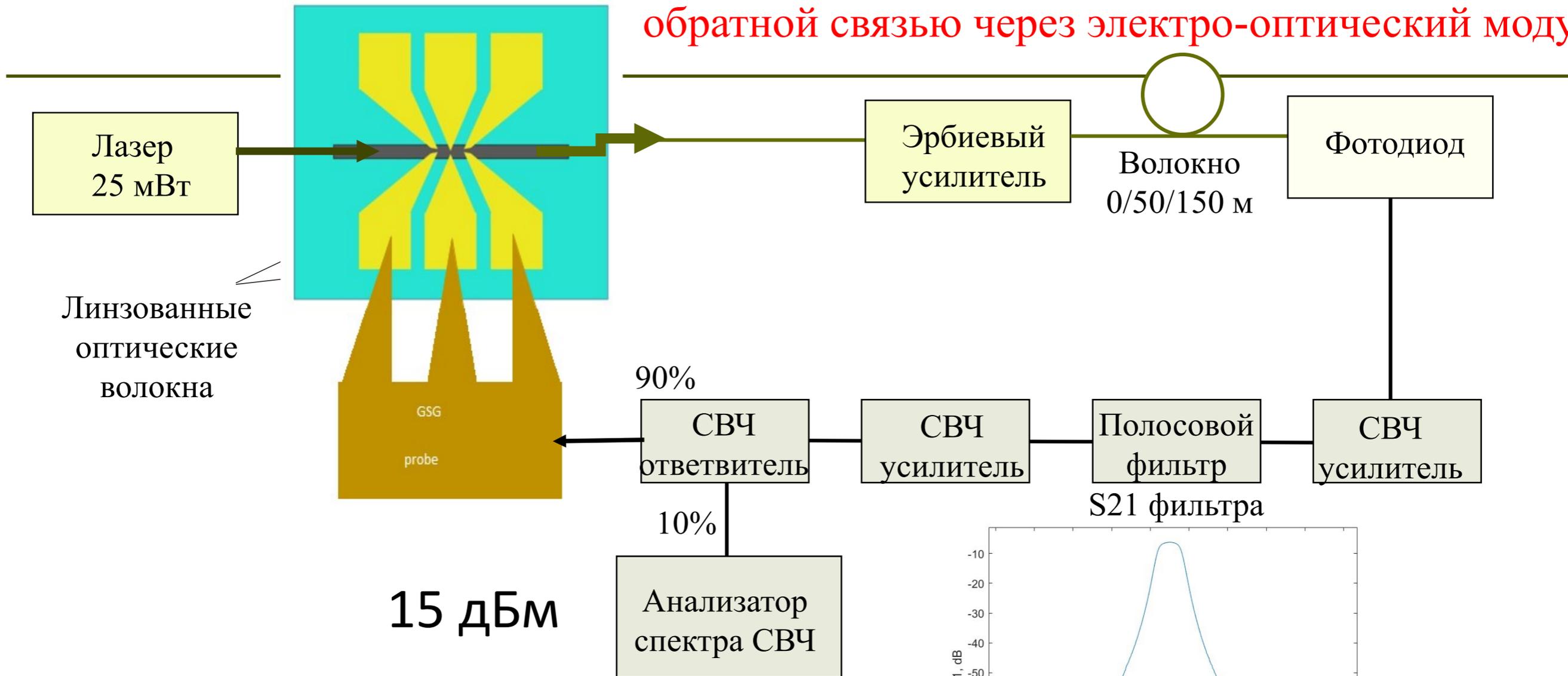
Appl. Phys. Lett. 124, 060503 (2024);  
A. X. Wang and W.-C. Hsu, Perspective on integrated photonic devices  
using transparent conductive oxides: Challenges and opportunities

# Комплексная схема из нескольких модуляторов для повышения экстинкции



квантовая электроника, 2022, том 52, номер 12, 1102–1113  
Коньшев, Леонов, Наний, Старых, Трещиков, Убайдуллаев (Т8)

# Малошумящий автогенератор СВЧ диапазона с обратной связью через электро-оптический модулятор

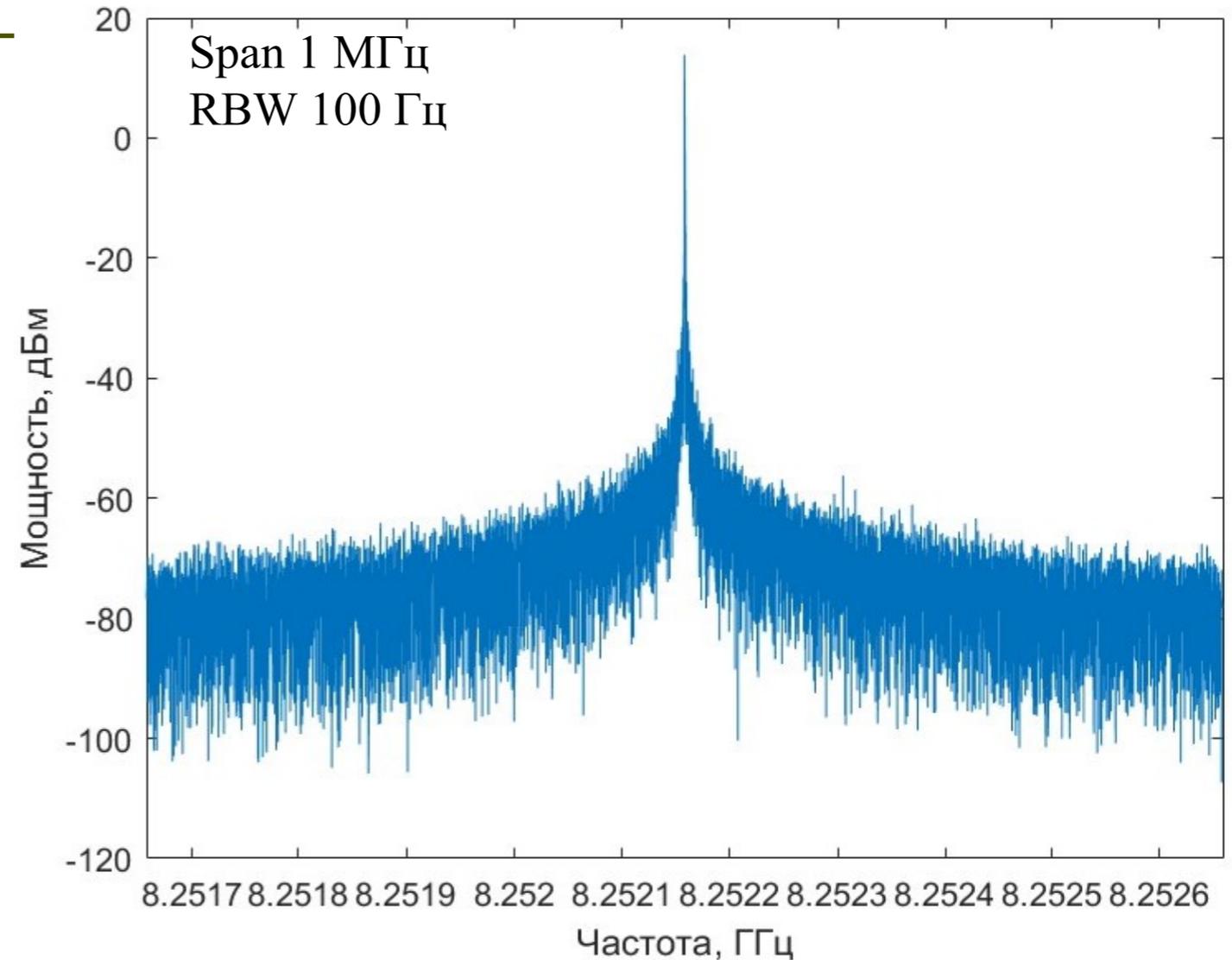
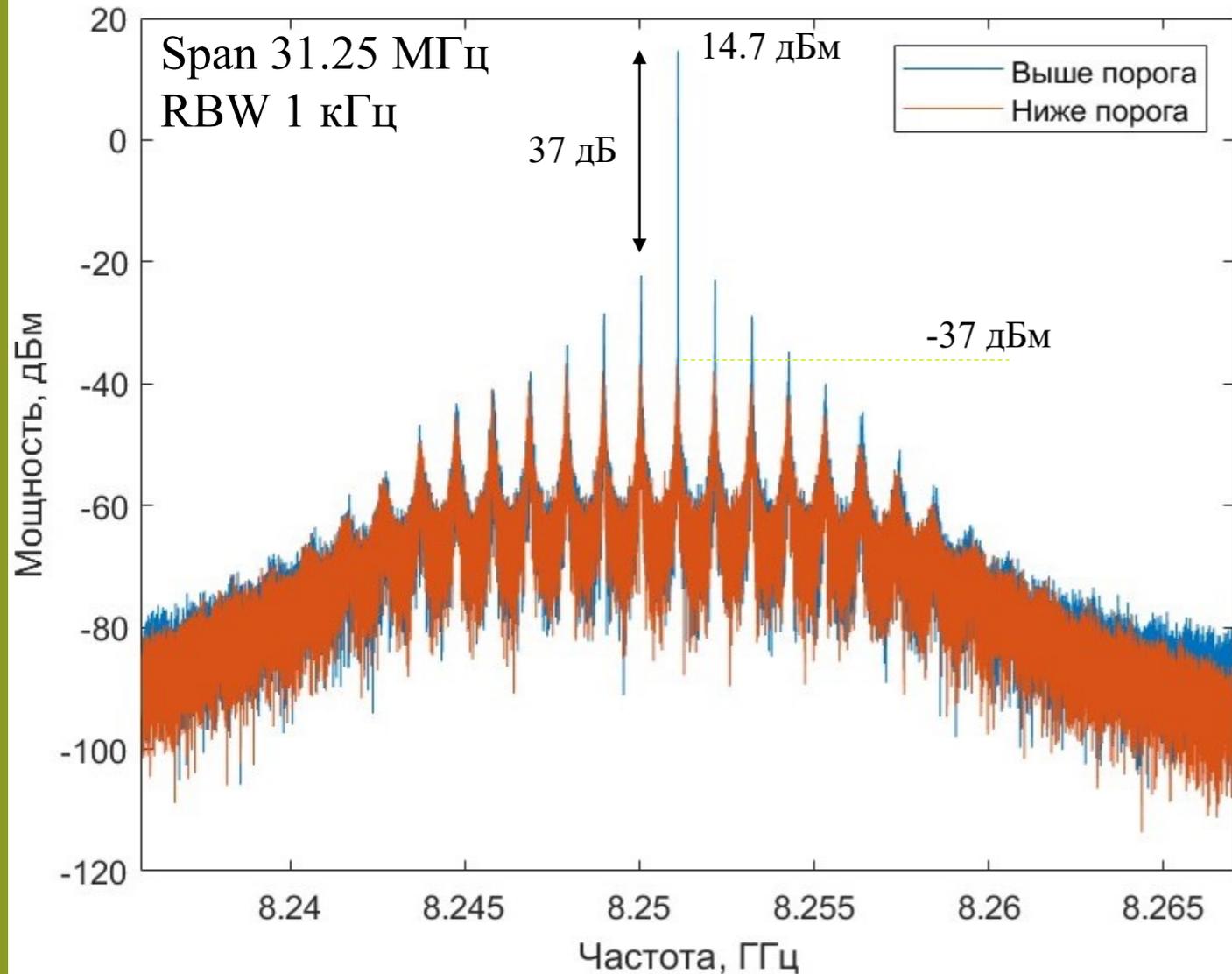


ALEXANDER S. SMIRNOV,<sup>1,\*</sup> S. S. KOSOLOBOV,<sup>1</sup> A. K. ZEMTSOVA,<sup>1</sup> D. S. ZEMTSOV,<sup>1</sup> K. N. GARBUZOV,<sup>1</sup> I. A. PSHENICHNYUK,<sup>1</sup> I. YU. TATSENKO,<sup>2</sup> A. A. NIKITIN,<sup>2</sup> A. B. USTINOV,<sup>2</sup> A. A. BORTSOV,<sup>3</sup> AND V.P. DRACHEV<sup>1</sup>  
 Optoelectronic microwave oscillator based on integrated Si-ITO plasmonic modulator, *submitted*

## 150 метров волокна

Span – диапазон

RBW – разрешение прибора



Спектры, соответствующие двум токам накачки эрбиевого усилителя: выше порога (120 мА) и ниже порога (115 мА). Превышение порога наблюдалось при токе накачки усилителя 114-115 мА.

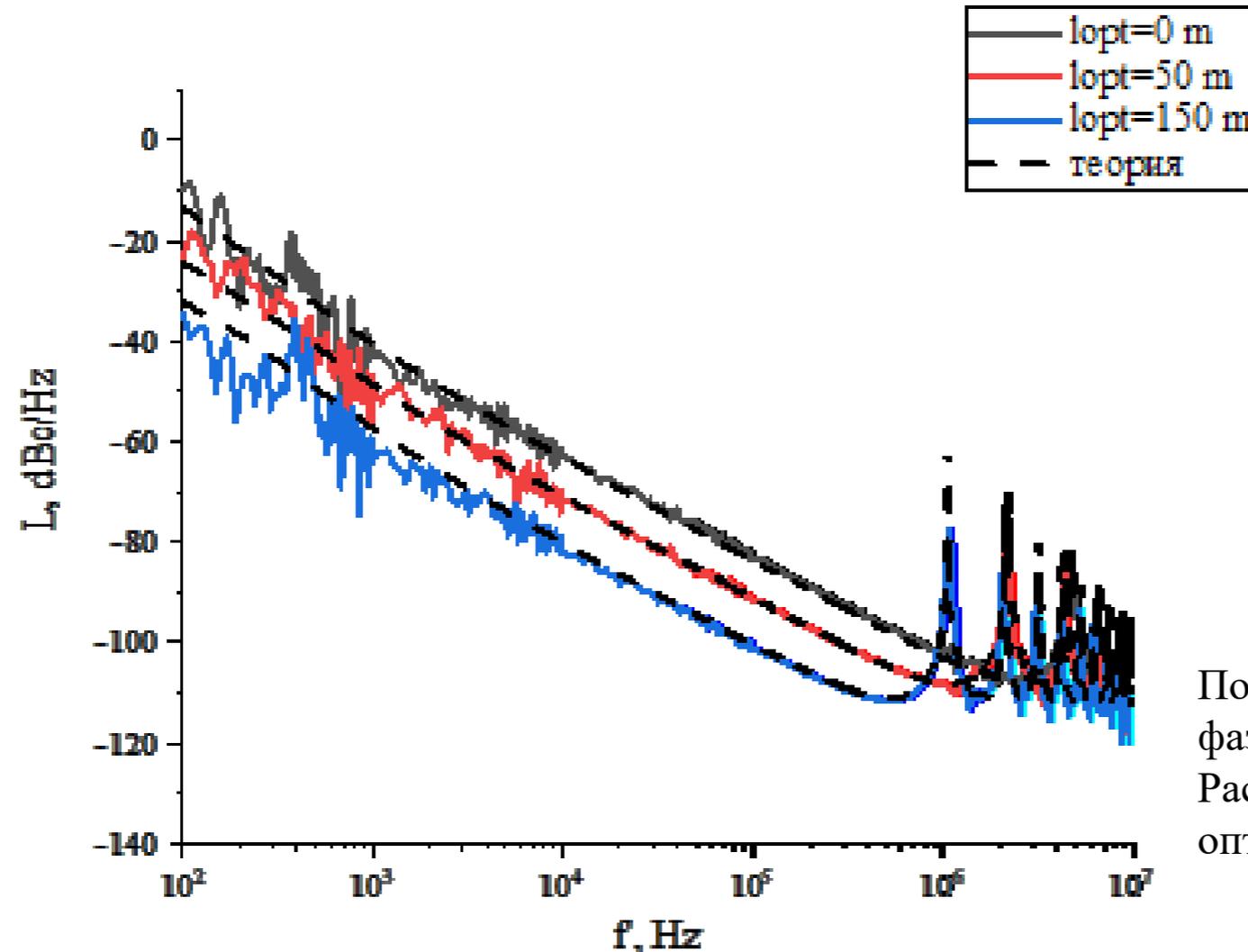
Ток на фотодетекторе примерно равнялся 2-2.1 мА при токе накачки усилителя в районе 115 мА.

# Фазовый шум оптоэлектронного генератора

Цельные линии – экспериментальные результаты,  
штриховые линии – результат теоретического расчета.

Сколтех - эксперимент

15 дБм  
(31,6 мВт)

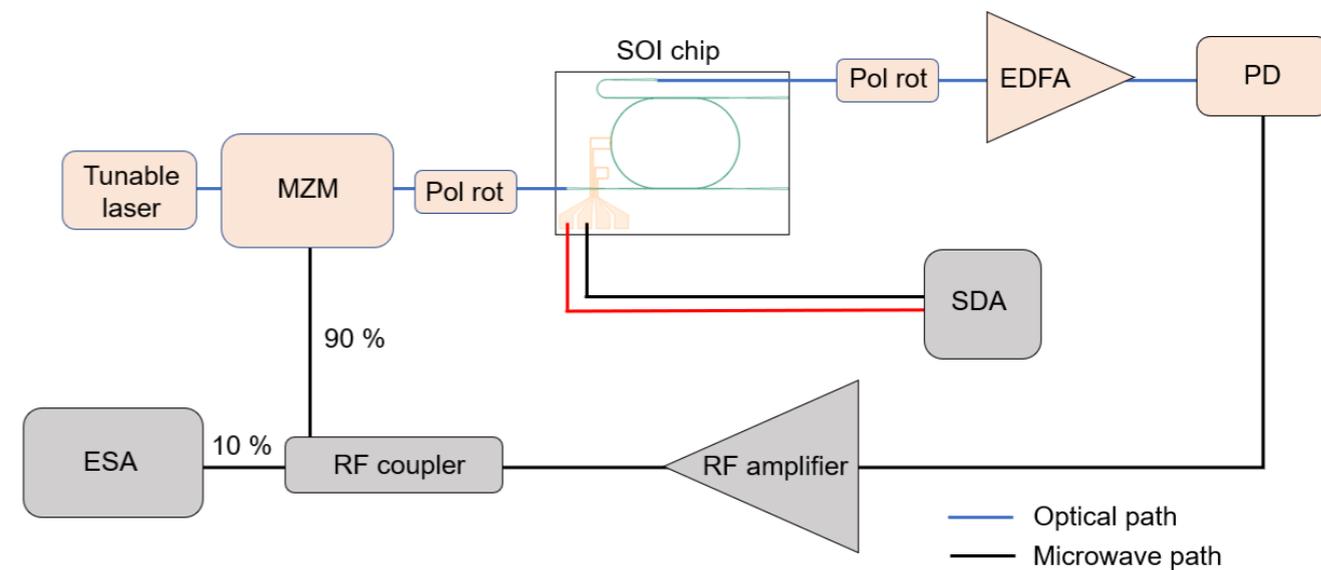
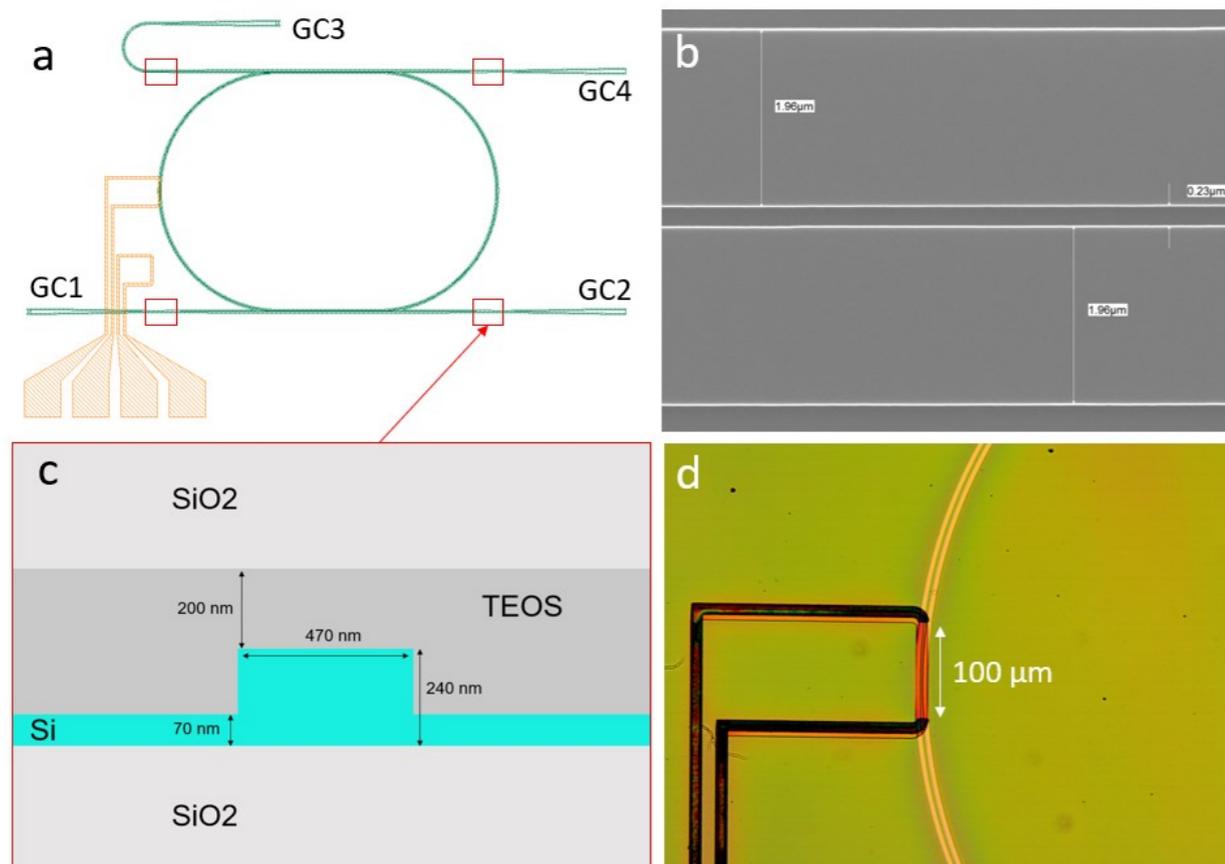


По частотам боковых пиков в спектре фазового шума.  
Расчет фазового шума проведен для длин оптоволокна 43, 93, 193 м.

ALEXANDER S. SMIRNOV,<sup>1,\*</sup> S. S. KOSOLOBOV,<sup>1</sup> A. K. ZEMTSOVA,<sup>1</sup> D. S. ZEMTSOV,<sup>1</sup> K. N. GARBUZOV,<sup>1</sup> I. A. PSHENICHNYUK,<sup>1</sup> I. YU. TATSENKO,<sup>2</sup> A. A. NIKITIN,<sup>2</sup> A. B. USTINOV,<sup>2</sup> A. A. BORTSOV,<sup>3</sup> AND V.P. DRACHEV<sup>1</sup>

Optoelectronic microwave oscillator based on integrated Si-ITO plasmonic modulator, *submitted*

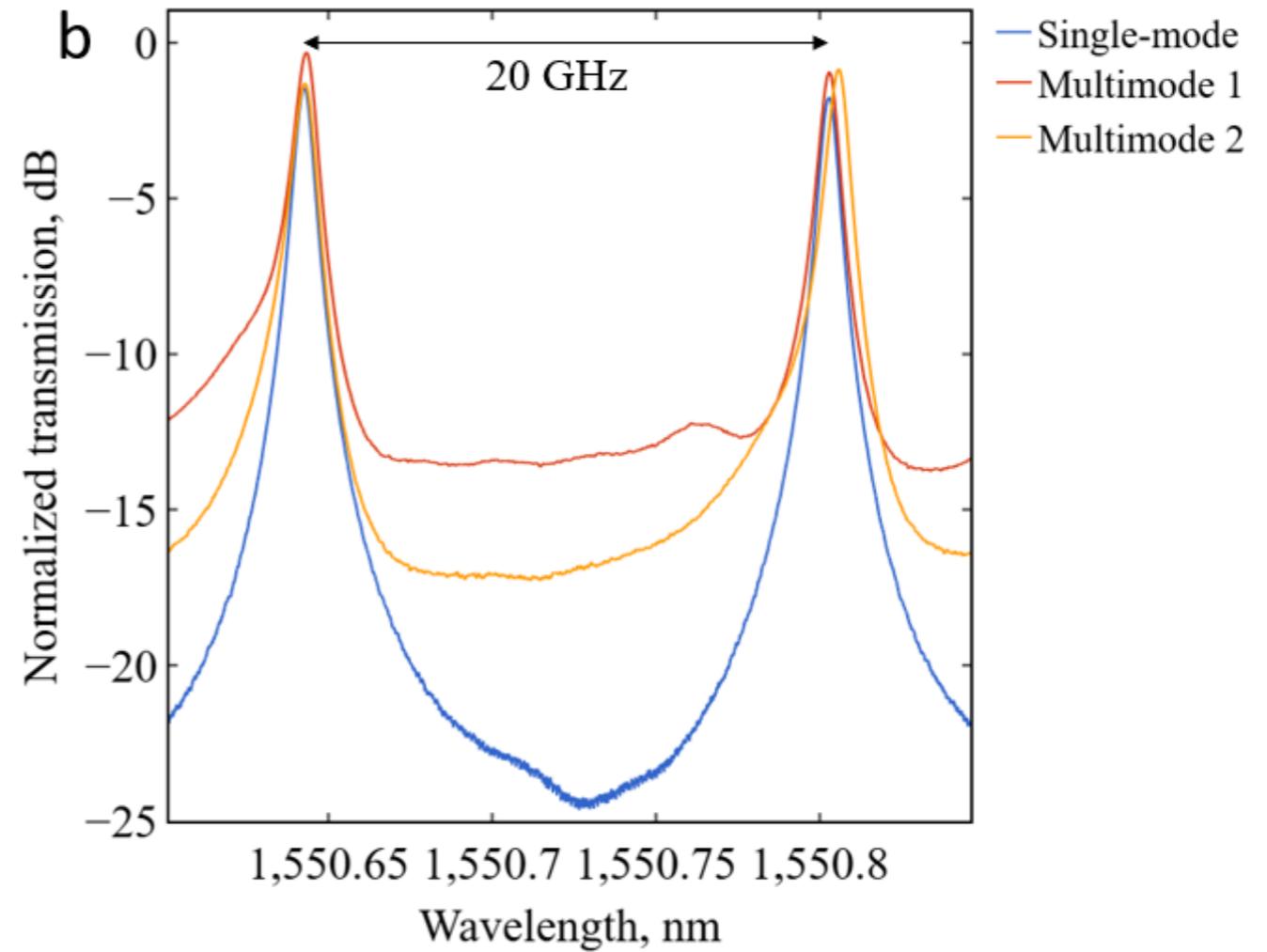
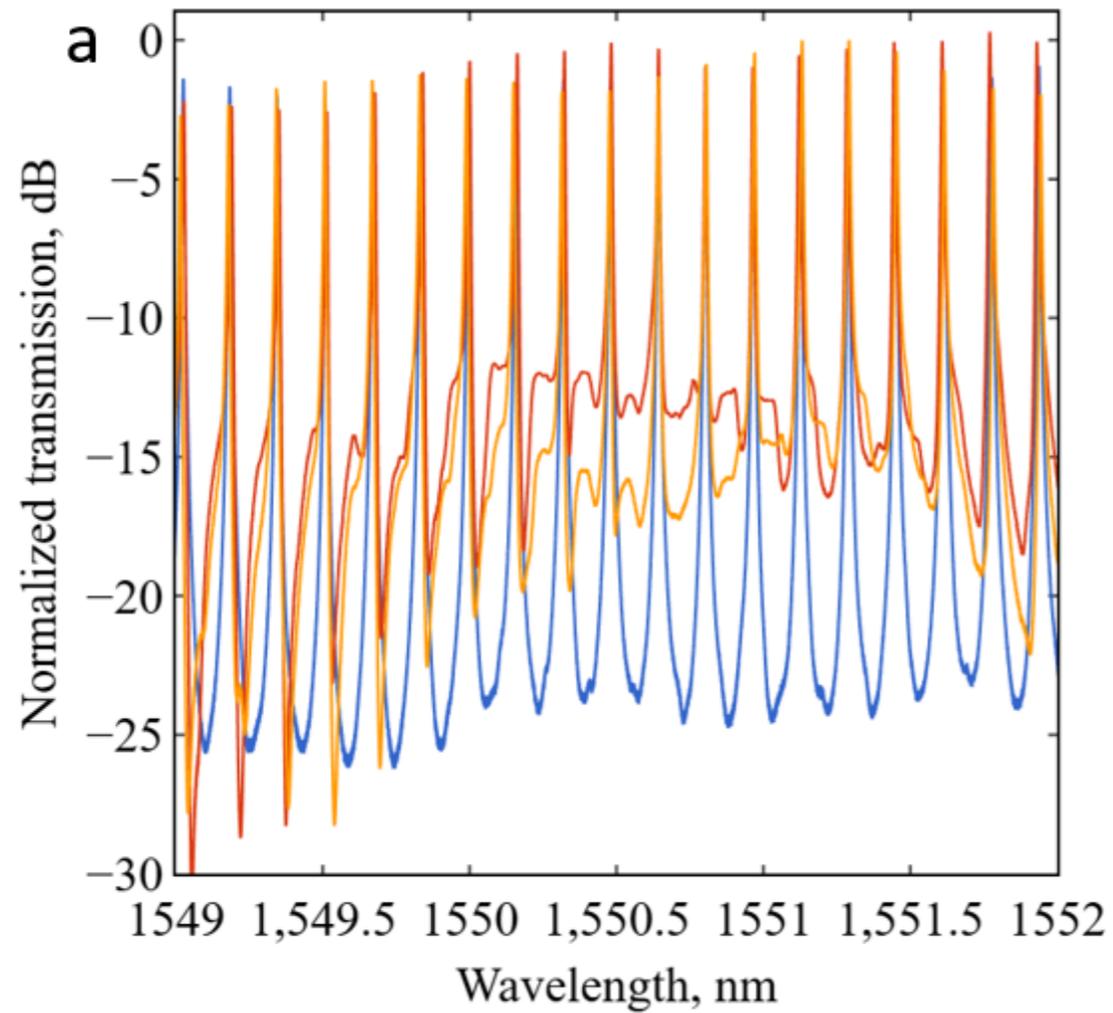
# Оптоэлектронный перестраиваемый СВЧ осциллятор с термо-оптической перестройкой микро-кольцевого резонатора в многомодовом режиме



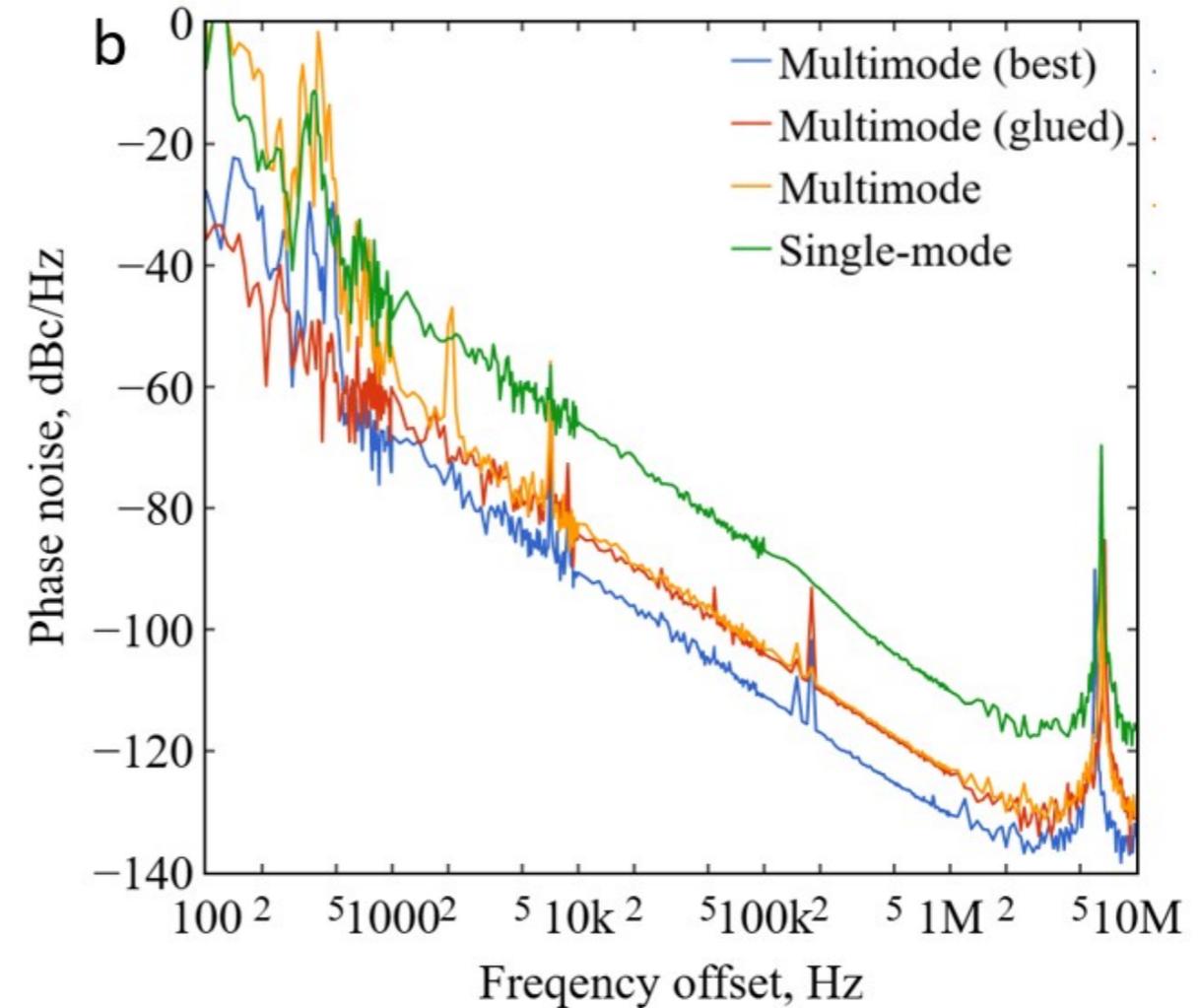
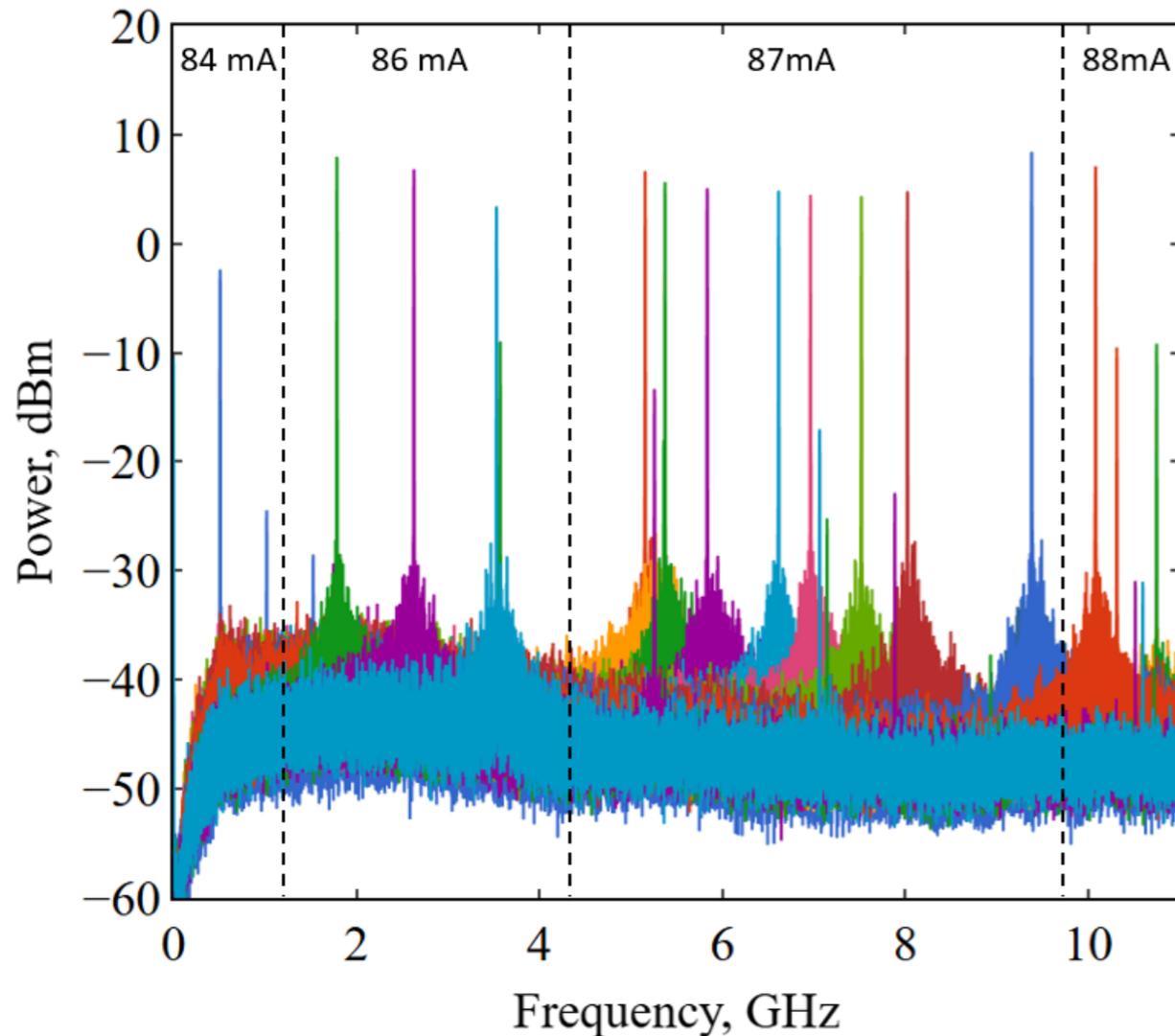
Мощность  
0 до 6 дБм  
(1 -4) мВт

A. S. Smirnov, D. S. Zemtsov, A. K. Zemtsova, K. N. Garbuzov, S. S. Kosolobov, V. P. Drachev, Skolkovo Institute of Science and Technology, submitted

# Преимущества многомодового микро-кольцевого резонатора для равномерной перестройки 0,5-10 ГГц



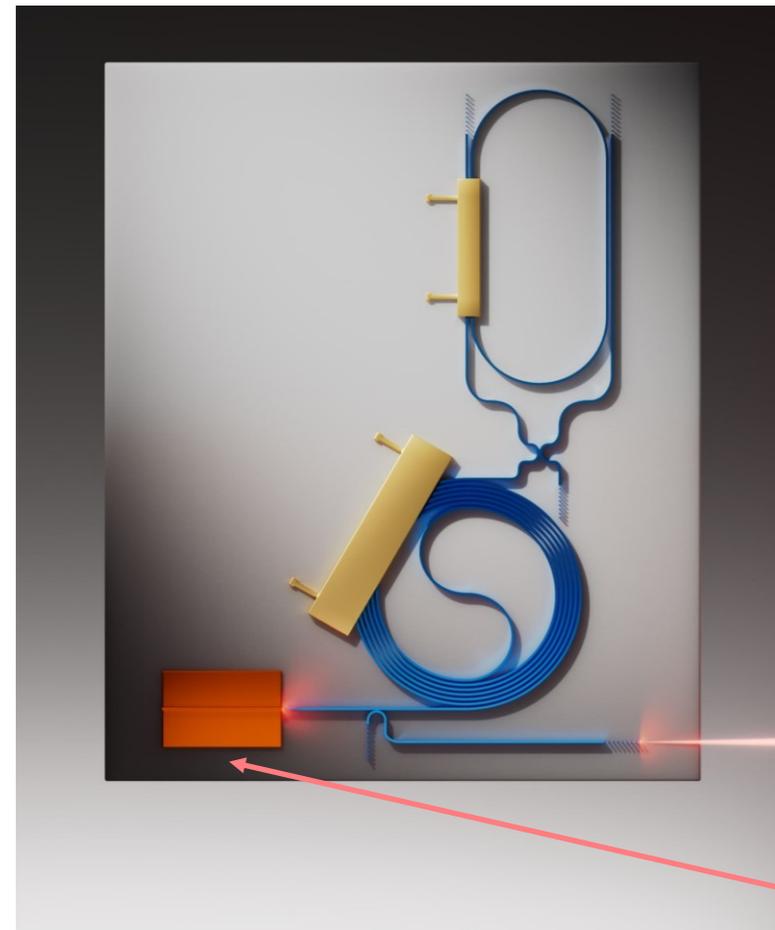
# Thermo-optically tunable optoelectronic microwave oscillator based on integrated silicon racetrack resonator in multimode regime



A. S. Smirnov, D. S. Zemtsov, A. K. Zemtsova, K. N. Garbuzov, S. S. Kosolobov, V. P. Drachev, Skolkovo Institute of Science and Technology, submitted

# Полностью интегральная схема на платформе Кремний-на-Изоляторе, формирующая высококогерентное лазерное излучение

Грант РФФИ № 23-91-06301 2024-2026 Компактные лазерные генераторы высокой когерентности  
 Сколтех, Центр Инженерной Физики, рук. Драчев В.П.  
 Ульяновский Гос. Университет, рук. Фотиади А.А.  
 МИЭТ, рук. Лазаренко П.И., МИСИС Ковалюк В.В.  
 НИИ "Полюс" имени М. Ф. Стельмаха" рук. Ладугин М.А.  
 НПК «Технологический центр», директор Светухин В.В.



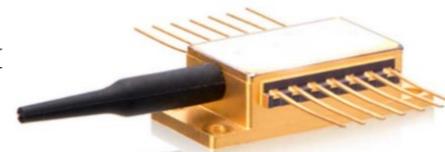
На выходе интегральной схемы лазерное излучение с шириной линии менее 0,5 кГц

Применение	
Формирование и обработка сигналов	Радиолокация
Лидары	Когерентные коммуникации

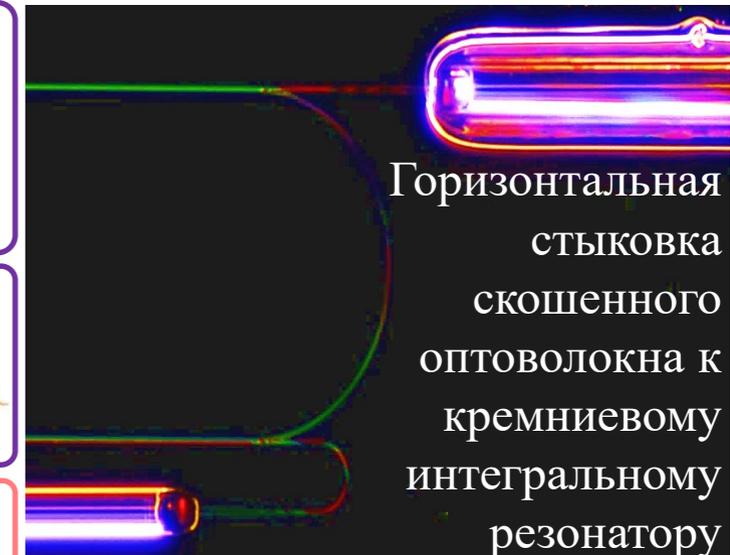
## Текущие результаты

Добротность  $>10^6$       Сужение линии с интегральным резонатором и волоконной задержкой с 200 кГц до 0,4 кГц  
 Резкость  $>100$   
 Контраст  $>30$  дБ

Финальный облик устройства – закорпусированный интегральный высококогерентный лазер



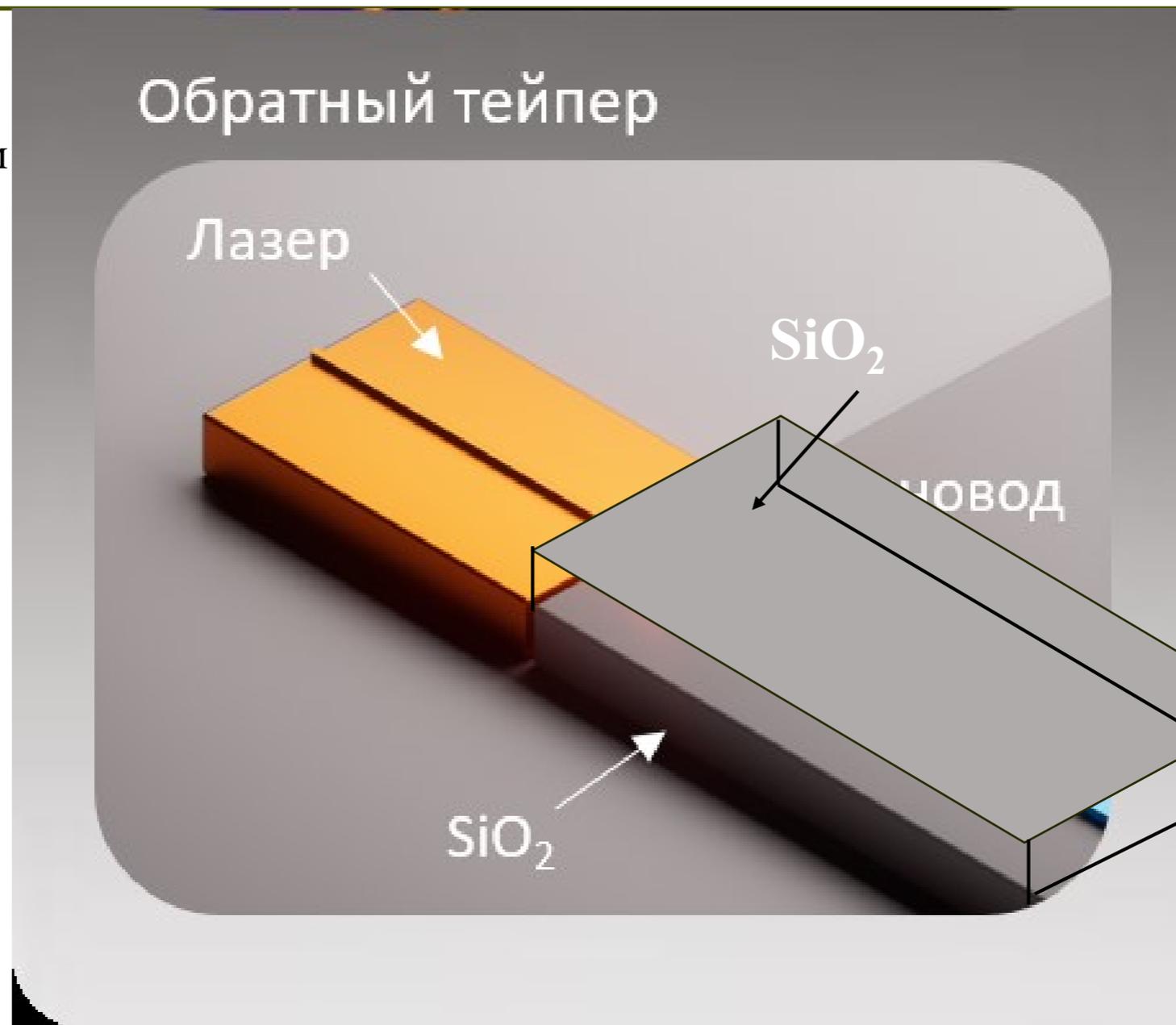
РОС лазер НИИ «Полюс»  
 Ширина линии более 200 кГц Мощность до 100 мВт



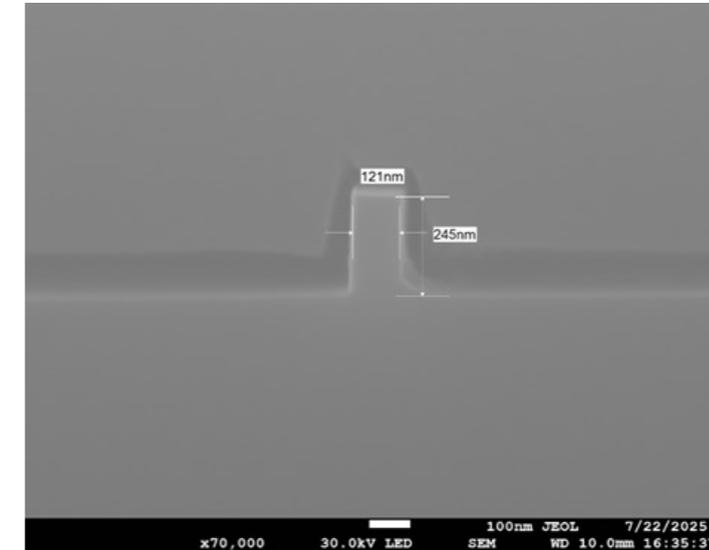
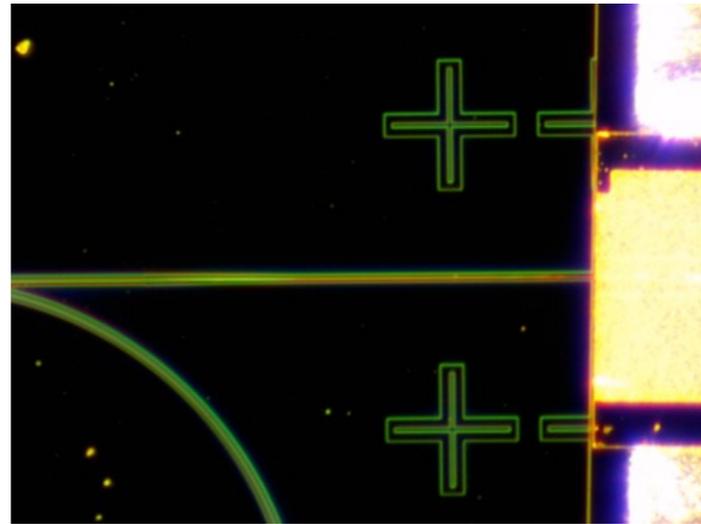
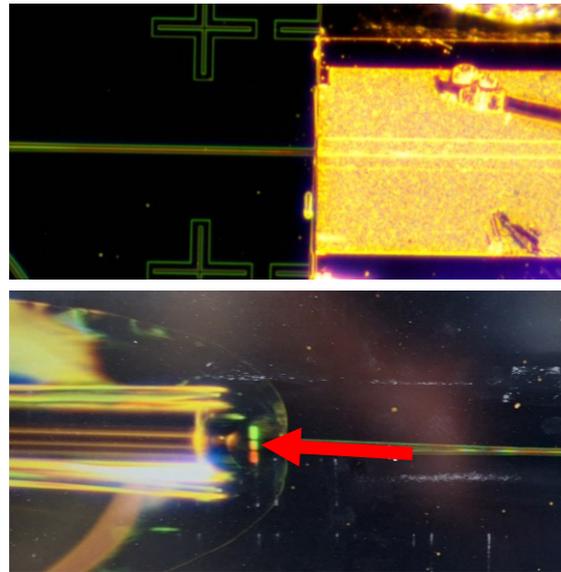
Горизонтальная стыковка скошенного оптоволокна к кремниевому интегральному резонатору

# Обратный тейпер для стыковки лазера и ФИС

Над тэйпером 3.5 мкм  
SiO<sub>2</sub>, под тэйпером 2 мкм

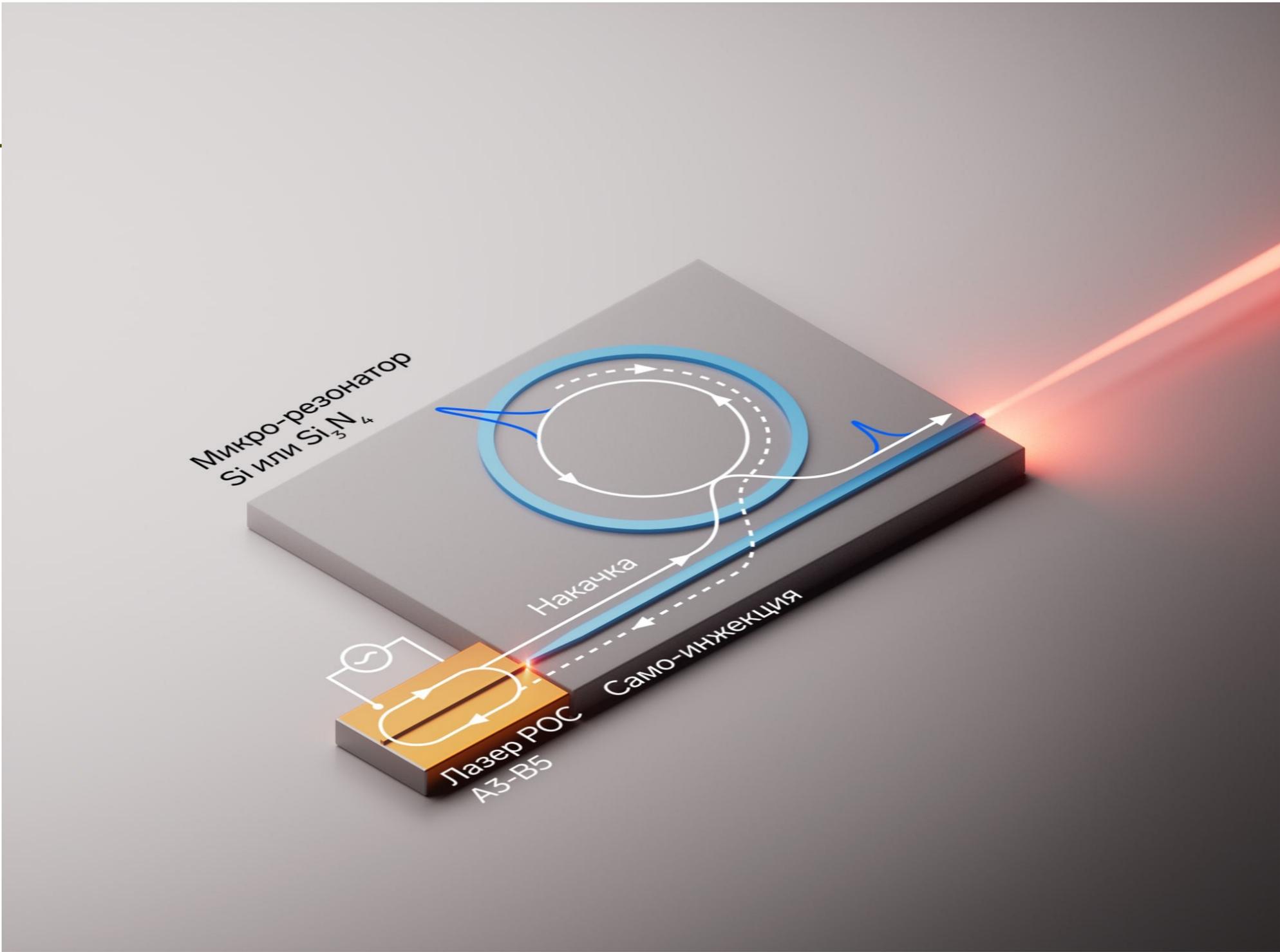


# Сборка Фотонной Интегральной Схемы и лазера РОС через согласующие обратные тейперы



СЭМ изображение торца узкой части Si обратного тейпера

Специально модифицированный лазер от «Полюса» с выдвинутой активной областью показывает потери на ввод излучения в торец волновода через **согласующий тейпер:  $2,5 \pm 0,5$  дБ.**



Специально модифицированный лазер от «Полюса» с выдвинутой активной областью показывает потери на ввод излучения в приклеенный торец волновода через согласующий тейпер:  $2,5 \pm 0,5$  дБ.

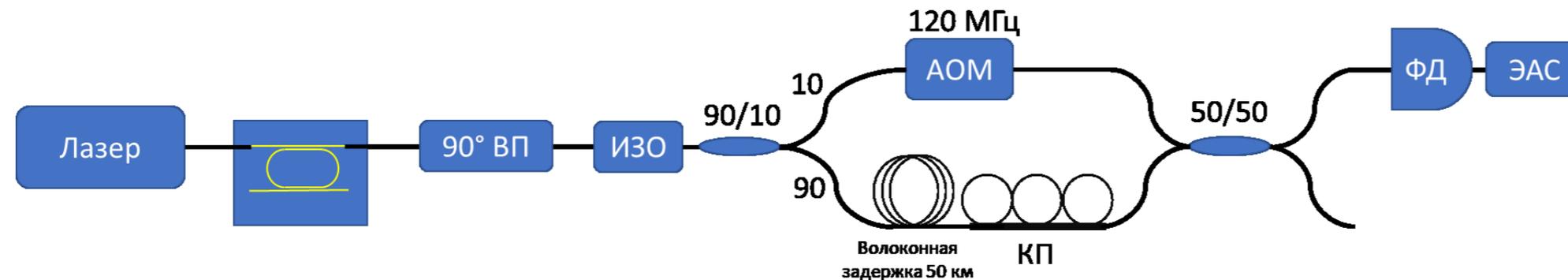
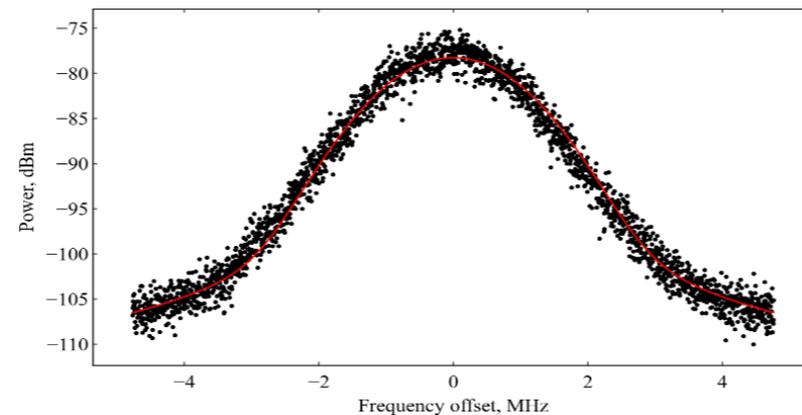
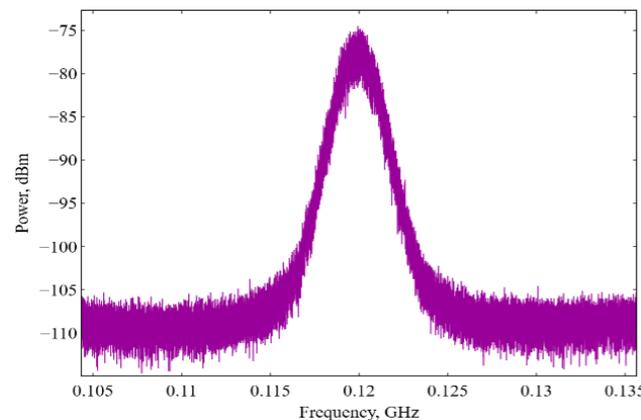


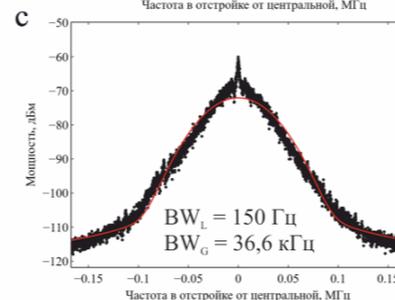
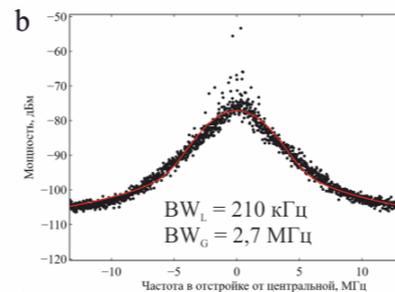
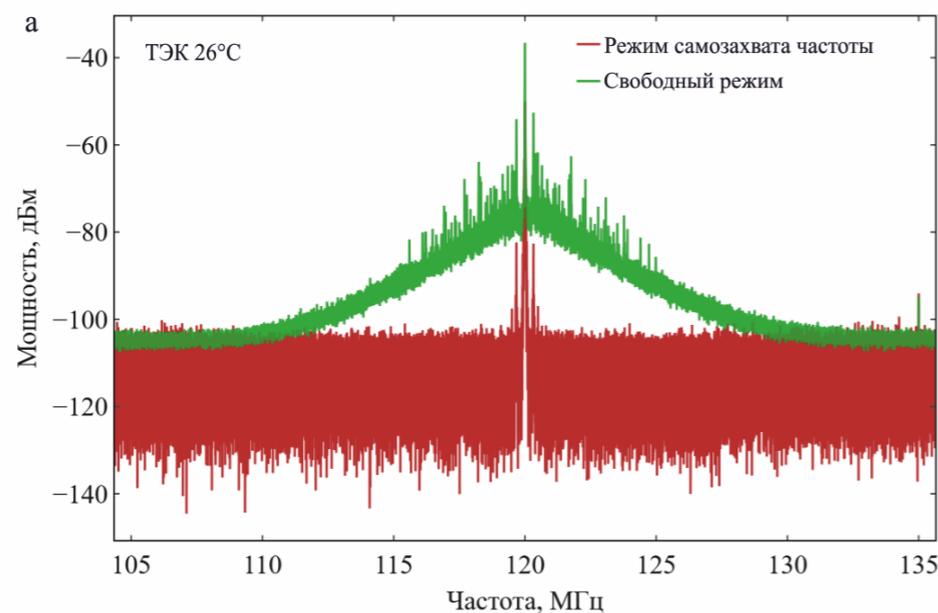
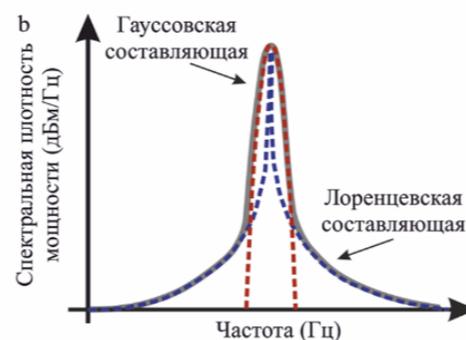
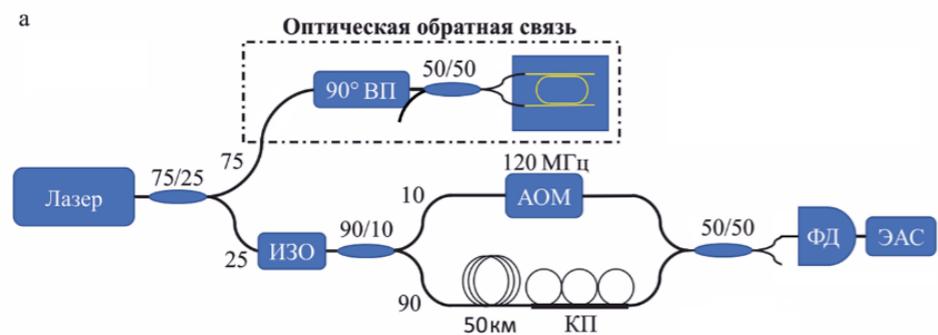
Рисунок – РОС-лазер, 90° ВП – 90° вращение поляризации, ИЗО – оптический изолятор, 90/10 или 50/50 делители, АОМ – акустооптический модулятор, ФД – фотодетектор, ЭСА – электронный анализатор спектра



Спектр мегагерцового диапазона (левая панель), спектр в зависимости от отстройки от частоты модуляции 120 МГц (правая панель).

Вывод: сужение спектральной линии РОС-лазера наблюдается даже в простейшей схеме внешнего резонатора с обратной связью с использованием рассеяния Рэля. Лоренцевская ширина уменьшена с 210 кГц до 34,3 кГц и Гауссовская ширина с 2,7 МГц до 1,36 МГц.

# Сужение лазерной линии внешним микро-кольцевым резонатором



Вывод: На платформе кремний на изоляторе реализован узкополосный лазерный источник на основе РОС-лазера и интегрального кремниевого кольцевого резонатора с добротностью  $1,6 \cdot 10^5$ . Применение внешнего резонатора позволило достичь сужение спектральной линии лазера с 210 кГц до **150 Гц** в режиме самозахвата частоты, что соответствует улучшению когерентности в **1400** раз. Гауссовская составляющая с 2,7 МГц до **36,6 кГц**

## О чем шла речь:

- CMOS КМОП
- Платформа кремний на изоляторе
- Фотонные АЦП, Si- плазмонный фотоприемник
- Разработка интегральных устройств на отечественной базе
- Плазмонный модулятор
- Малошумящий автогенератор СВЧ диапазона
- Интегральный лазер с высокой когерентностью

