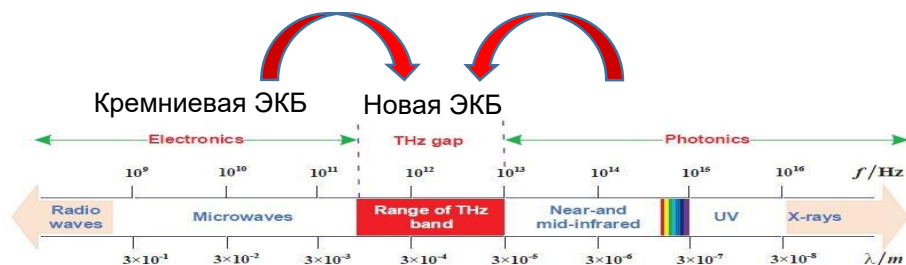
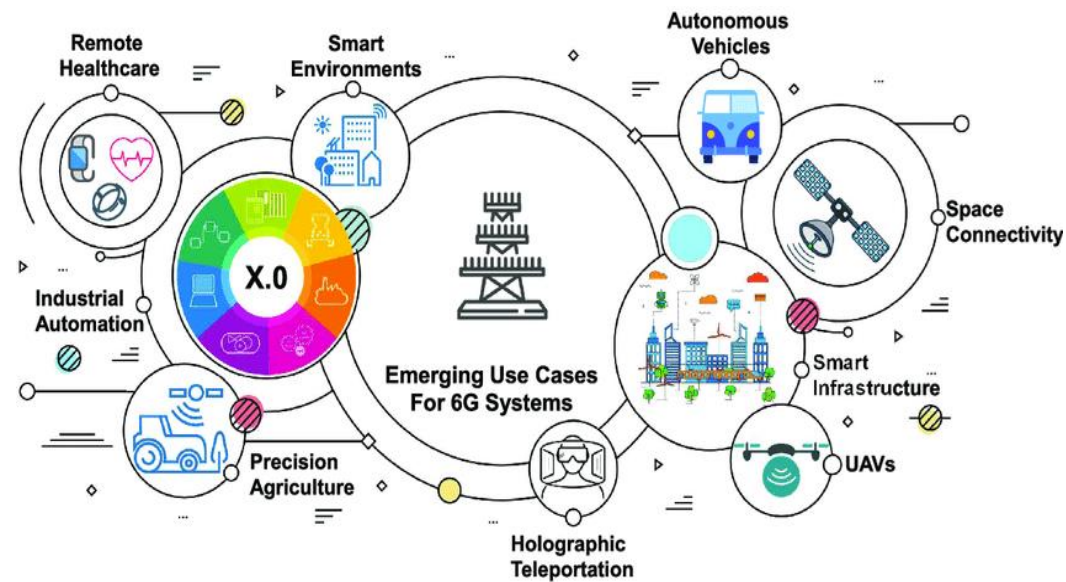




СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Новое поколение ЭКБ на радиофотонных принципах для сверхширокополосных каналов связи

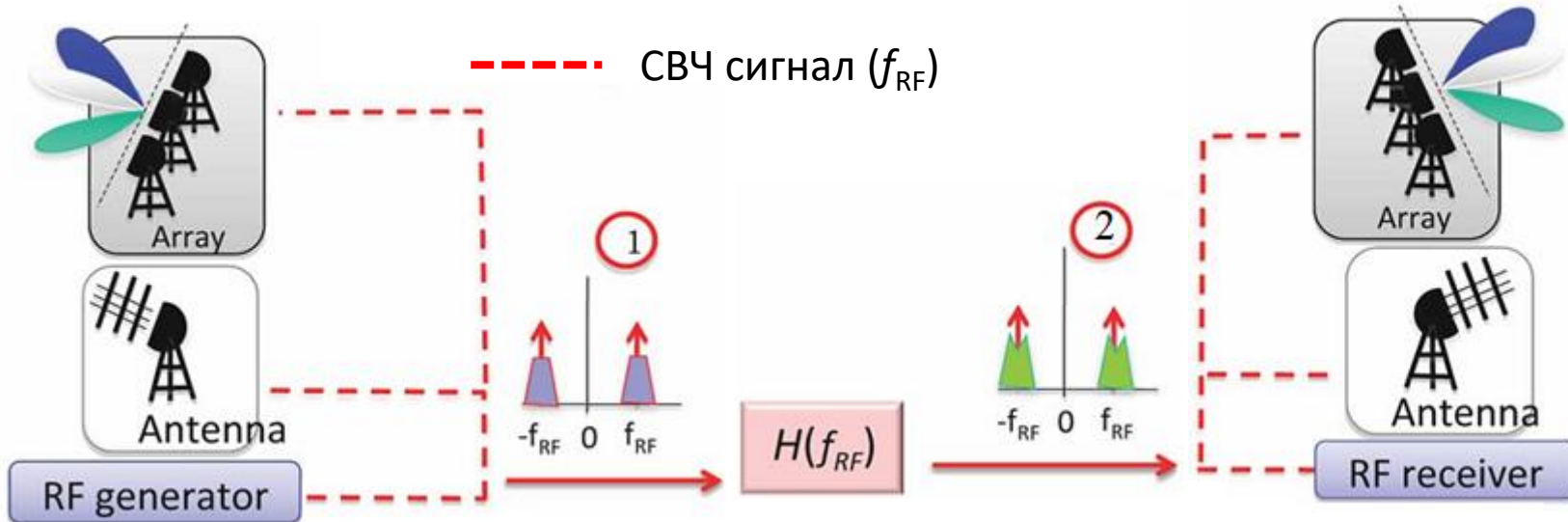
**Переход от классической
электроники к ТГц ЭКБ
основная тенденция развития
перспективных систем связи**



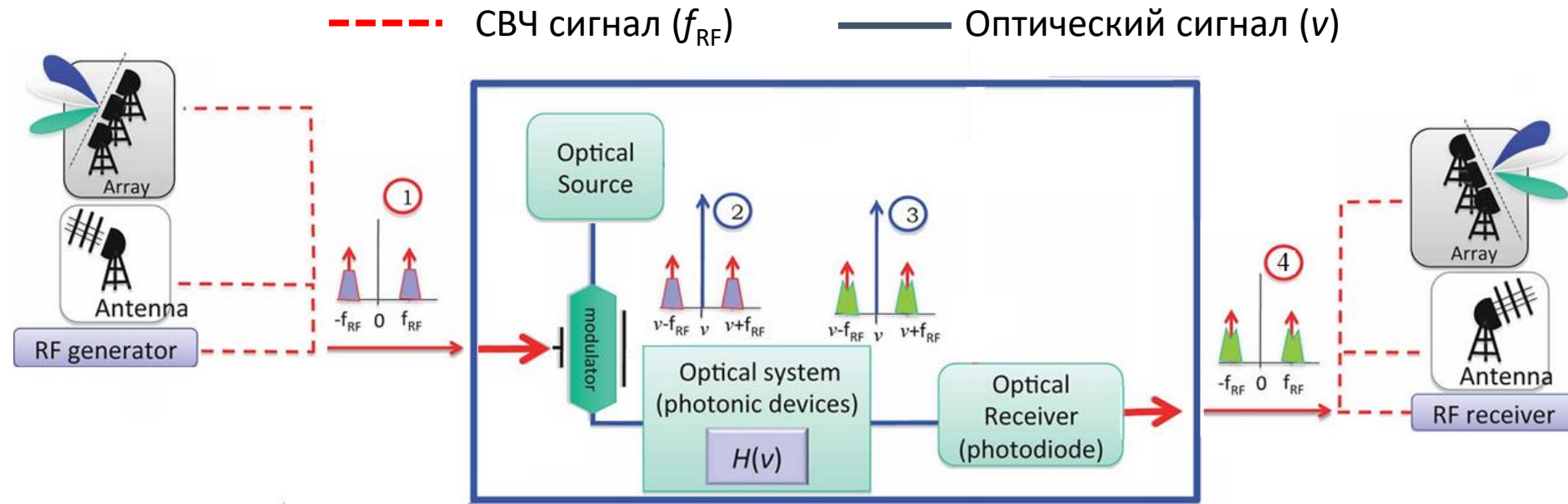
- Высокая скорость передачи данных
- Сверхплотное сетевое покрытие
- Низкое энергопотребление/энергоэффективность
- Сверхнизкие задержки
- Защищенность/безопасность/надежность

Развитие производства систем на кристалле, систем радиоэлектроники и связи в субмиллиметровом диапазоне на базе технологий GaAs, GaN, SiC, InP, алмаза и нелинейных диэлектриков

Традиционная радиоэлектронная система



Радиофотонная система



- Преимущества радиофотоники по сравнению с традиционными системами радиоэлектроники:
- ✓ Сверхширокий диапазон рабочих частот, покрывающий гигагерцовые и терагерцовые частоты
 - ✓ Сверхширокий спектр обрабатываемого сигнала
 - ✓ Высокая скорость обработки сигнала
 - ✓ Высокая устойчивость к помехам

Основные направления исследований, проводимые ЛЭТИ в области Электроники, Фотоники и Радиофотоники



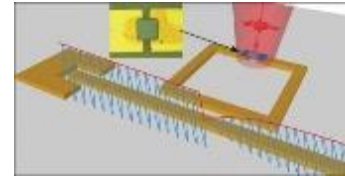
Многоцелевые
Реконфигурируемые
Радиосистемы



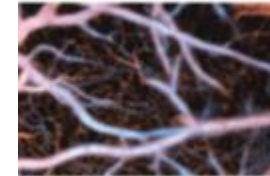
Высокоскоростная
Оптическая
Связь



Квантовые компьютеры
Квантовая криптография



Сенсоры
Измерительное
оборудование



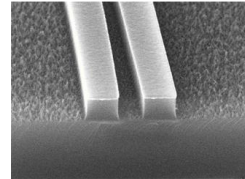
Томография и
спектрометрия



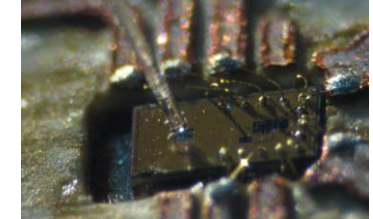
Беспилотный транспорт
Интернет вещей

1. ИНТЕГРАЛЬНАЯ РАДИОФОТОНИКА

Пассивная
компонентная база



Сверхкомпактные
генераторы СВЧ

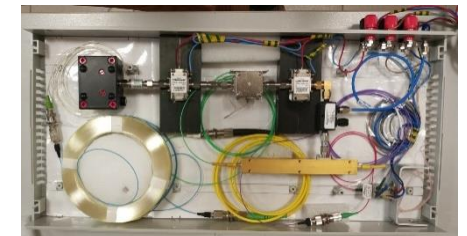


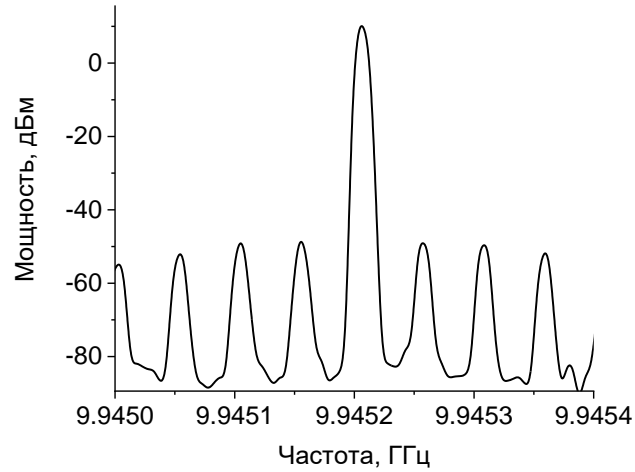
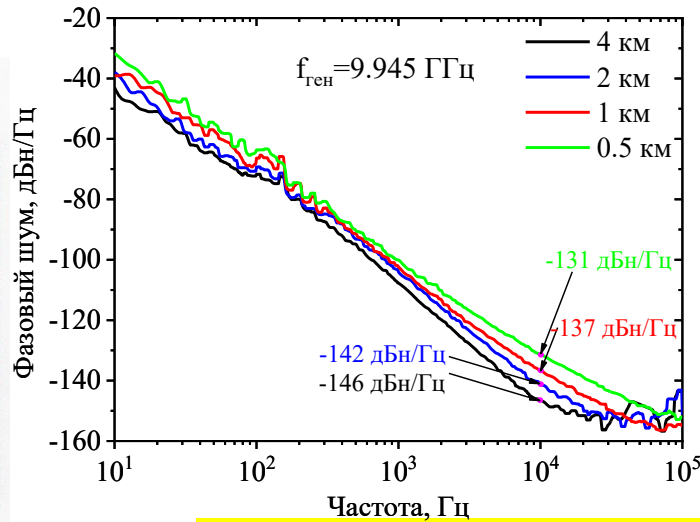
2. ВОЛОКОННАЯ РАДИОФОТОНИКА

Дисперсионный
спектральный анализ

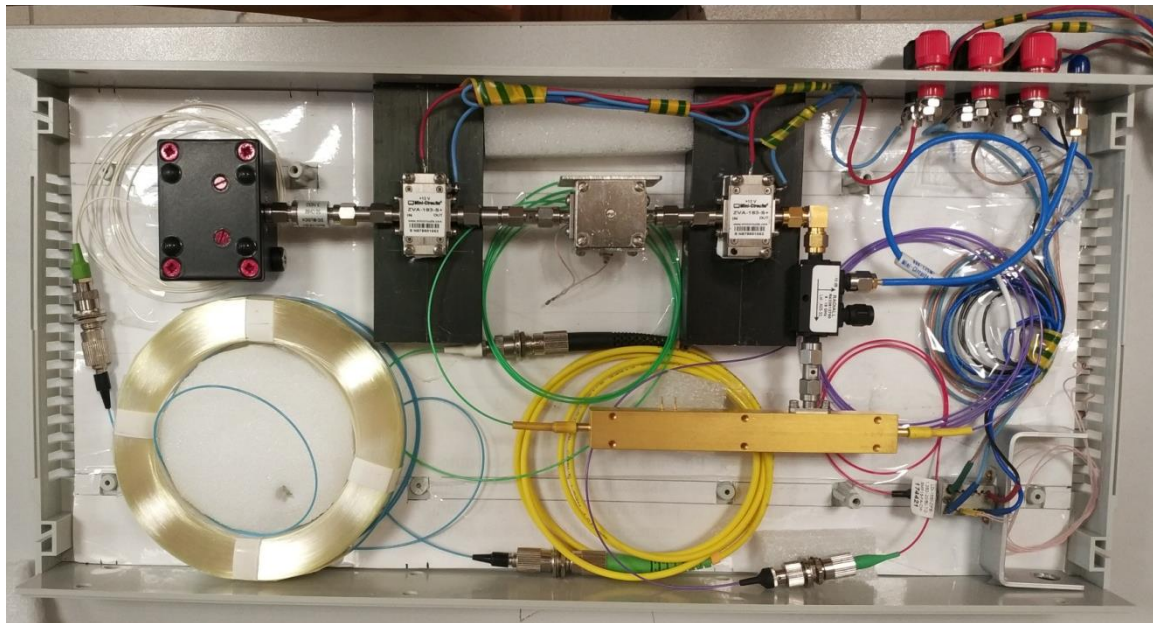


Малошумящие
перестраиваемые
генераторы СВЧ





На частотах f генерации 3 ГГц и 10 ГГц - перестройка ± 500 МГц
 Фазовый шум при отстройке от f на 10 кГц: -146 дБн/Гц



Frequency band	$\mathcal{L}_{10k} \leq -140$ dBc/Hz	$-140 < \mathcal{L}_{10k} \leq -120$ dBc/Hz
L band (1–2 GHz), S band (2–4 GHz), or C band (4–8 GHz)	Ustinov <i>et al.</i> (2018) [T ₃₋₁₂]	Bogatay, Vidmar, and Batagelj (2016) [3], Z. Chen <i>et al.</i> (2017) [5], M ₅₋₂₁ , Jin <i>et al.</i> (2019) [5], Li, Li, and Yao (2012) [T ₀₋₁₀], Y. Liu <i>et al.</i> (2018) [4], Liu <i>et al.</i> (2019) [T ₆₋₁₈], Loh <i>et al.</i> (2012) [3], Nguimdo <i>et al.</i> (2015) [6], Saleh <i>et al.</i> (2014) [6], Xie <i>et al.</i> (2016) [T ₁₋₁₅]
X band (8–12 GHz)	Chembo, Hmima <i>et al.</i> (2009) [10, P], Chembo, Volyanskiy <i>et al.</i> (2009) [10], Eliyahu, Seidel, and Maleki (2008) [10], Fleyer <i>et al.</i> (2016) [T ₉₋₁₀], Hong <i>et al.</i> (2016) [10], Lelièvre <i>et al.</i> (2017) [10], Okusaga <i>et al.</i> (2013) [10], Salik, Yu, and Maleki (2007) [9, P], Yao and Maleki (2000) [10], Yu, Salik, and Maleki (2005) [9, P], Zhang and Yao (2018) [10], Zhenghua <i>et al.</i> (2016) [10], Zhou and Blasche (2005) [10]	Bagnell, Davila-Rodriguez, and Delyyett (2014) [T ₆₋₆₀], Dai <i>et al.</i> (2015) [10, P], Dai <i>et al.</i> (2018) [10], Fan <i>et al.</i> (2019) [11], Fleyer and Horowitz (2018) [10], Fu <i>et al.</i> (2017) [10], Hao, Cen <i>et al.</i> (2018) [T ₈₋₁₂], Hosseini, Banai, and Kartner (2017) [11], Ji, Yao, and Maleki (1999) [10], Jia, Yu, Z. Wang <i>et al.</i> (2015) [10, P], Kaba <i>et al.</i> (2006) [10], Liu <i>et al.</i> (2012) [10, P], Liu, Liu <i>et al.</i> (2018) [10, M ₁₀₋₄₀], Mutugala <i>et al.</i> (2017) [10], Peng <i>et al.</i> (2017) [T ₇₋₄₀], Romisch <i>et al.</i> (2000) [11], Saleh, Llopis, and Ghisla (2013) [10], Ustinov <i>et al.</i> (2018) [T ₃₋₁₂], Volyanskiy, Chembo <i>et al.</i> (2010) [10], Xiao <i>et al.</i> (2019) [T ₈₋₁₄], Xie <i>et al.</i> (2013) [T ₅₋₃₈], Xu, Jin, and Chi (2013) [10, M ₁₀₋₂₀], Zhu and Chi (2016) [10], Zhu, Du, and Pan (2018) [10, P]

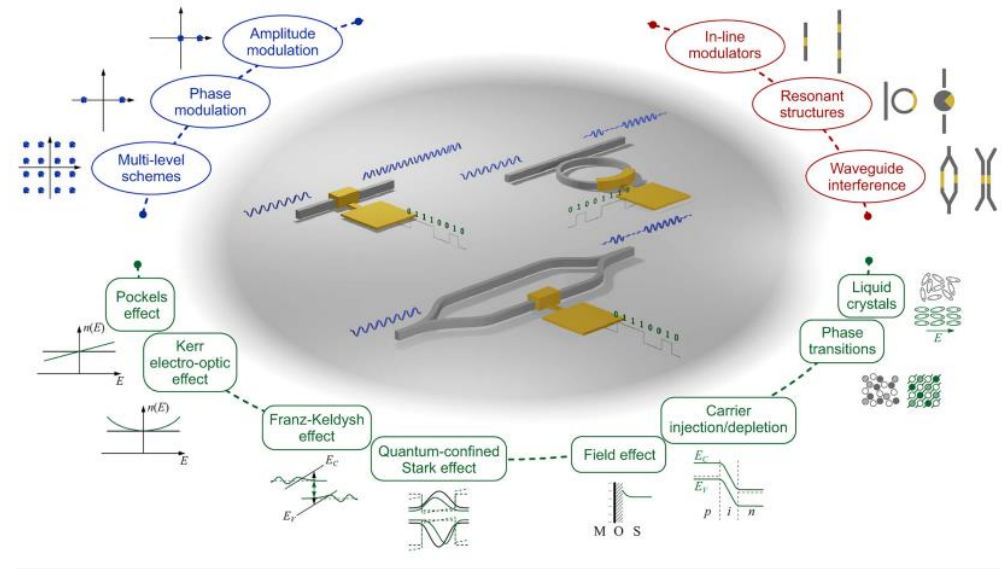
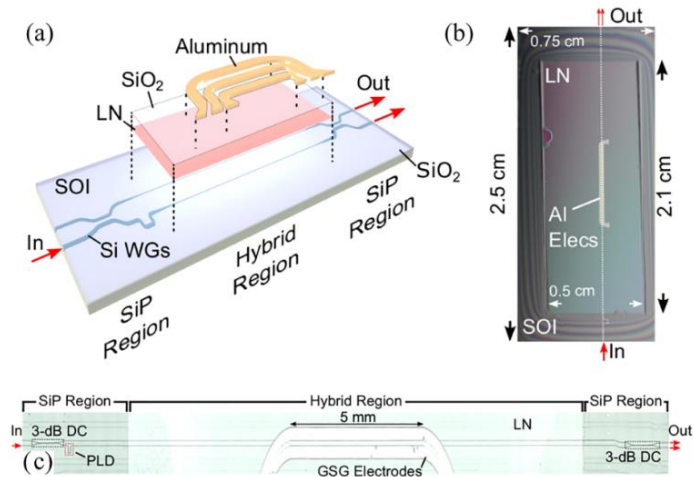
Патент № 162940.
 Дата выдачи: 27.06.2016.
 «Перестраиваемый СВЧ генератор»
 Патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Получены рекордно низкие фазовые шумы для перестраиваемых СВЧ генераторов

Chembo, Yanne K., et al. "Optoelectronic oscillators with time-delayed feedback." *Reviews of Modern Physics* 91.3 (2019): 035006.

Современные подходы к реализации ФИС

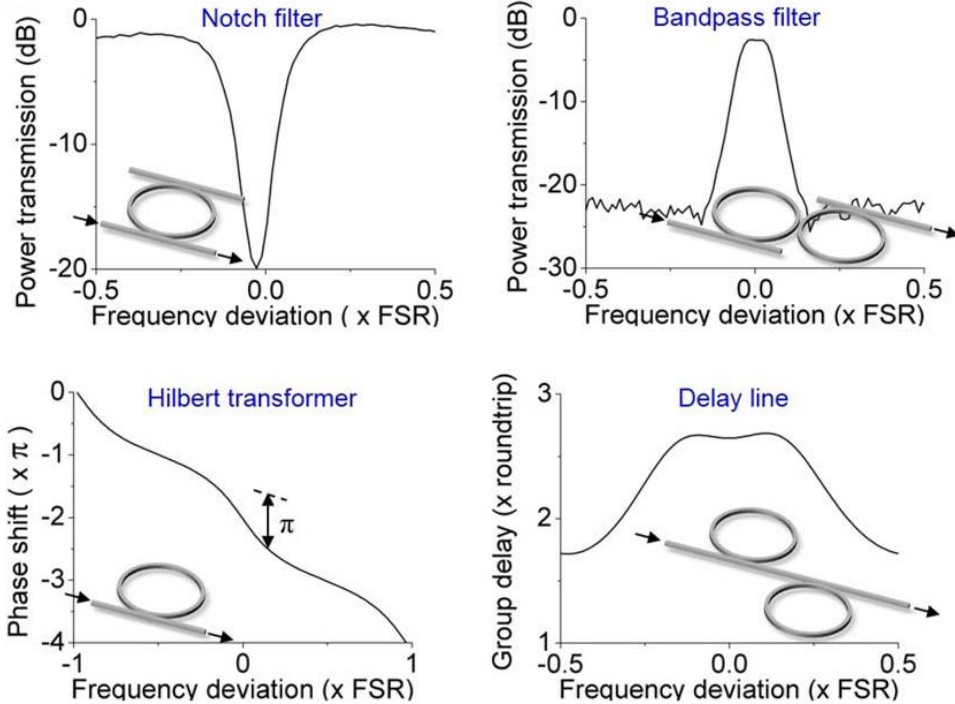
Гибридная технология SOI/LN



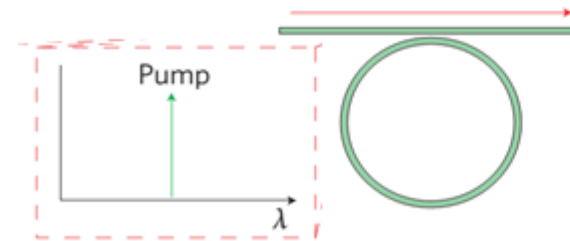
LiNbO₃, LiTaO₃, BaTiO₃, GaAs, GaN, InP, CdTe,
ZnTe, Si, Si₃N₄

Практические применение планарных кольцевых резонаторов

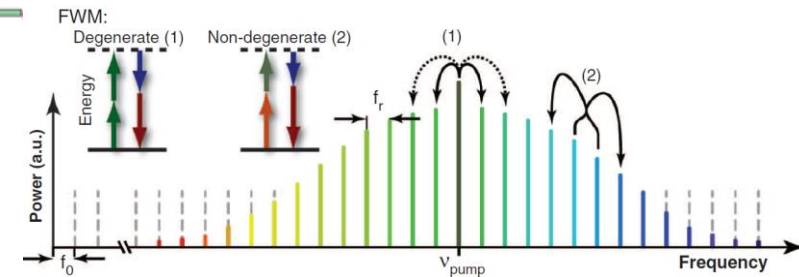
Линейный режим



резонаторов



Нелинейный режим

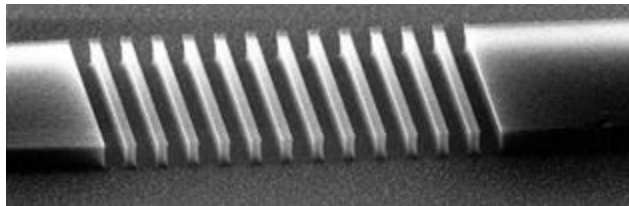
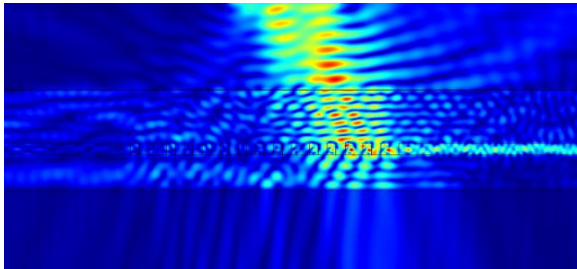
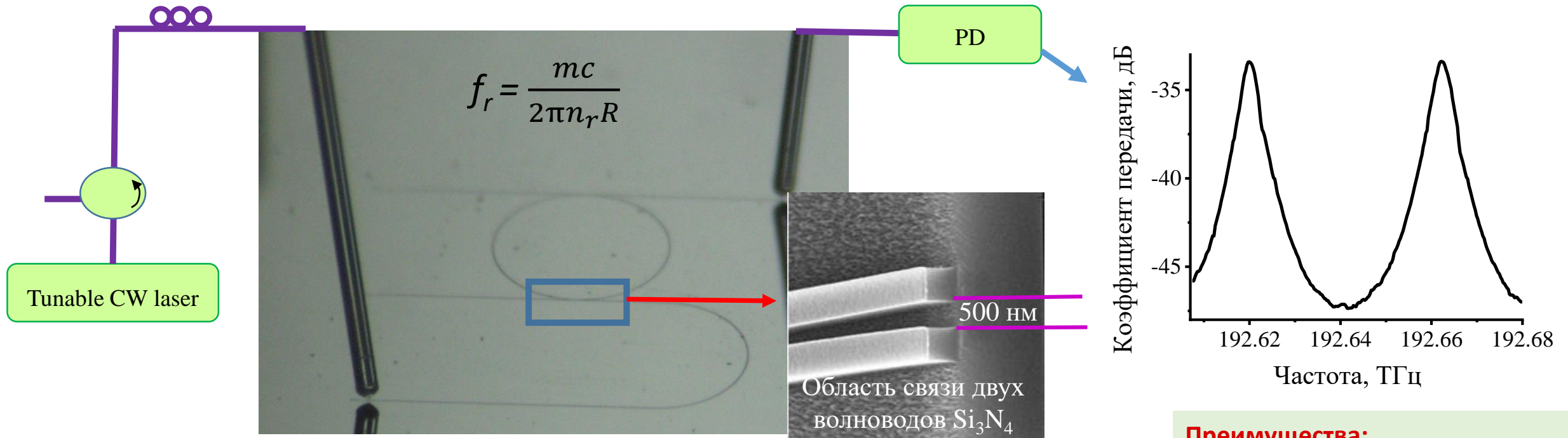


Применение кольцевых резонаторов, работающих в нелинейном режиме :

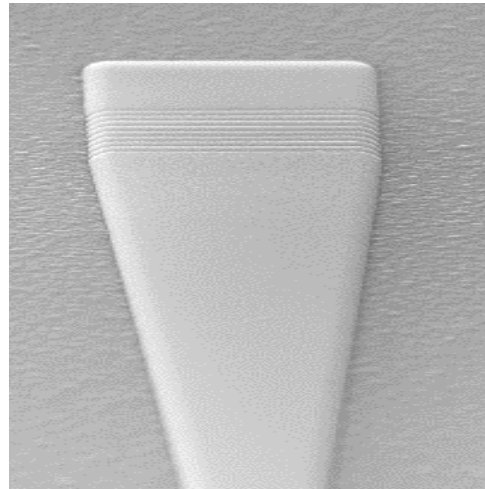
- ✓ Когерентные беспроводные технологии
- ✓ Сверхбыстрое измерение скорости и расстояния
- ✓ Стабильные стандарты времени и генераторы частоты
- ✓ Спектроскопия и оптическая когерентная томография
- ✓ Альтернативная замена лазеров с синхронизацией мод
- ✓ Фотонные радарные системы и АЦП

Компактный генератор монохроматического сигнала





Брегговская решетка в волноводе Si₃N₄



Покрытый SiO₂ волновод Si₃N₄

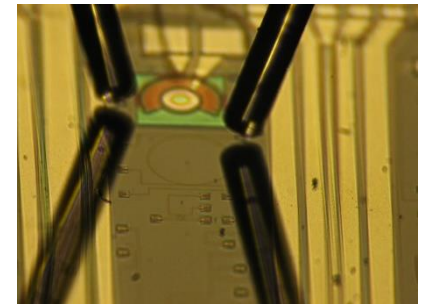
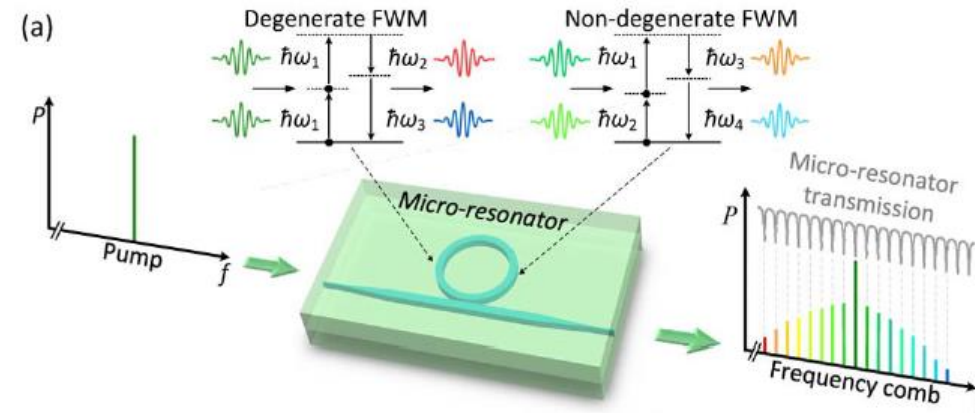
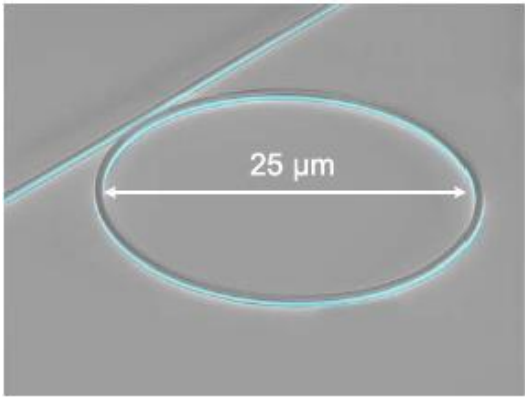
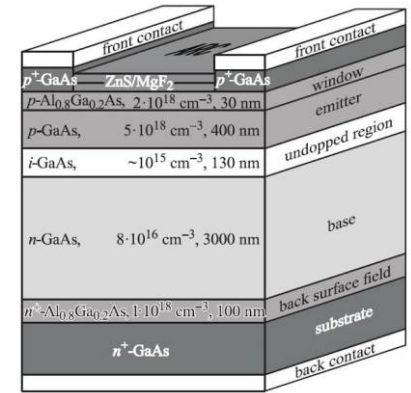
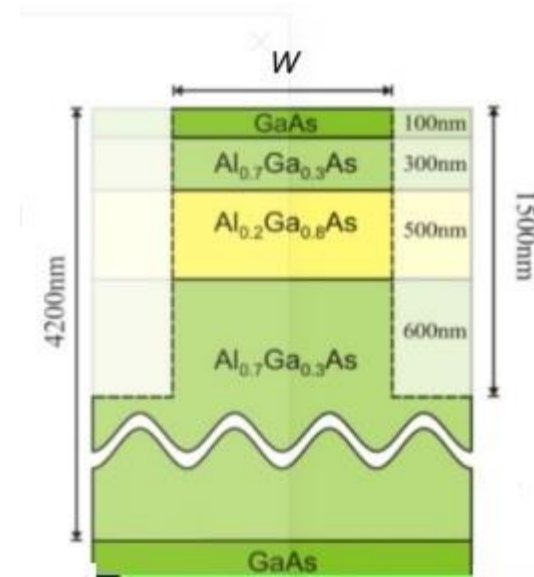
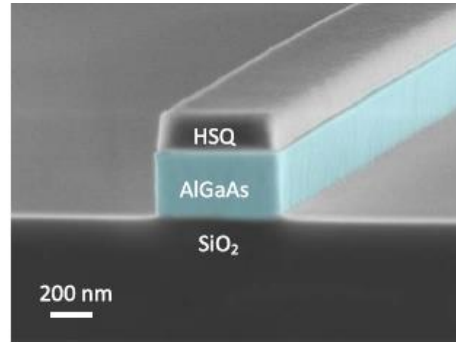
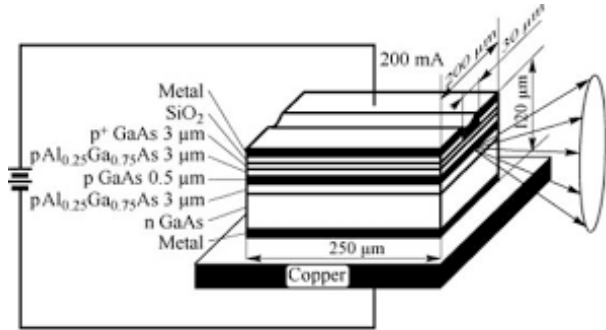
Применения:

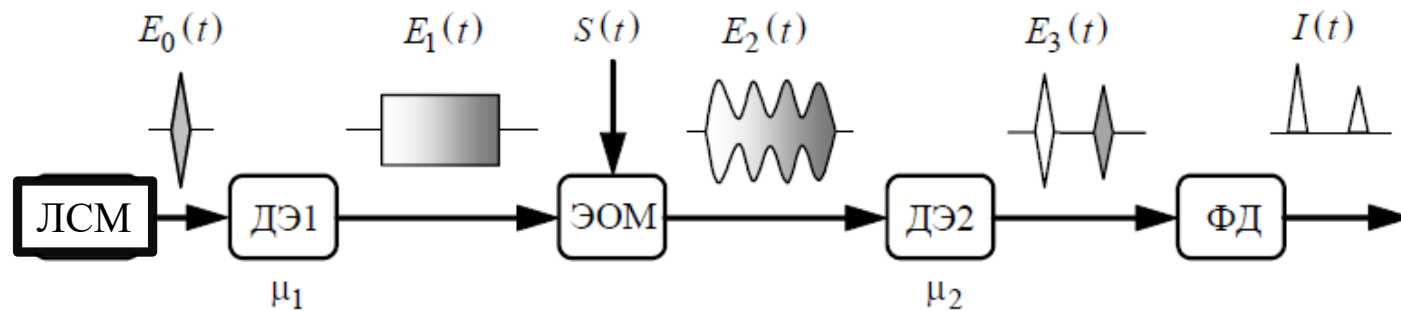
- ✓ Фильтры
- ✓ Мультиплексоры
- ✓ Модуляторы
- ✓ Линии задержки
- ✓ Фазовращатели
- ✓ Дисперсионные элементы
- ✓ Гироскопы

Преимущества:

- Сверхширокий диапазон рабочих частот
- Высокая скорость обработки сигнала
- Малые потери
- Малые размеры и вес
- Высокая устойчивость к помехам
- Топологическая норма **150 нм**

Излучатель, планарный волновод и фотоприёмник на основе технологии материалов АЗВ5

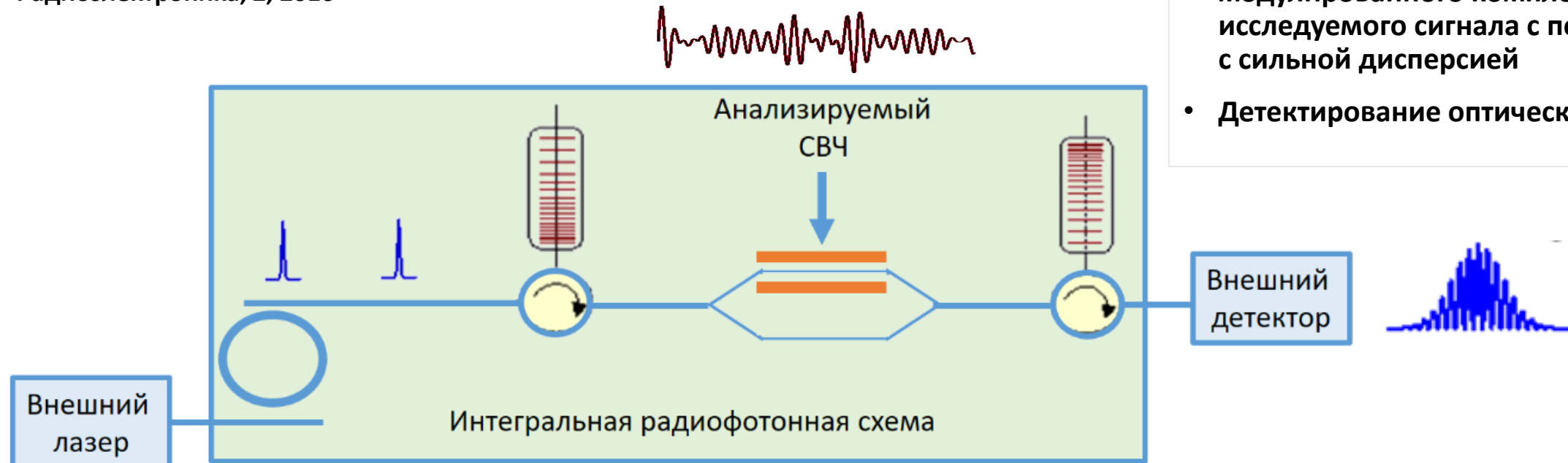




Л. А. Аронов, С. В. Грачев, В. Н. Ушаков, Известия Высших Учебных Заведений
Радиоэлектроника, 2, 2016

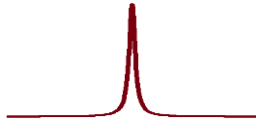
Принцип работы

- Генерация оптического ЛЧМ-сигнала с помощью волокна с сильной дисперсией
- Модуляция оптического ЛЧМ-сигнала радиосигналом
- Формирование оптического сигнала, модулированного комплексным спектром исследуемого сигнала с помощью волокна с сильной дисперсией
- Детектирование оптического сигнала

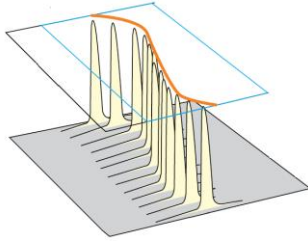


Разработка анализатора спектра с частотной полосой 40 ГГц и разрешением 10 МГц с возможностью перехода к интегральному исполнению и расширения полосы анализа до 100 ГГц

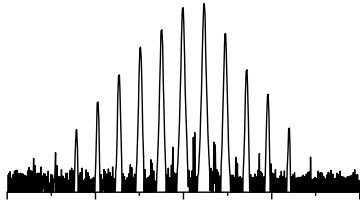
оптоэлектронные генераторы



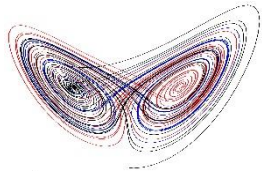
Малозумящие генераторы монохроматического СВЧ сигнала



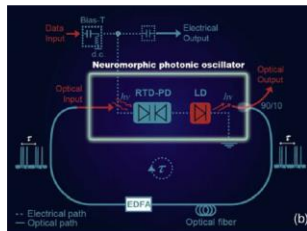
СВЧ генераторы скачущей частоты



Синтезаторы сетки частот

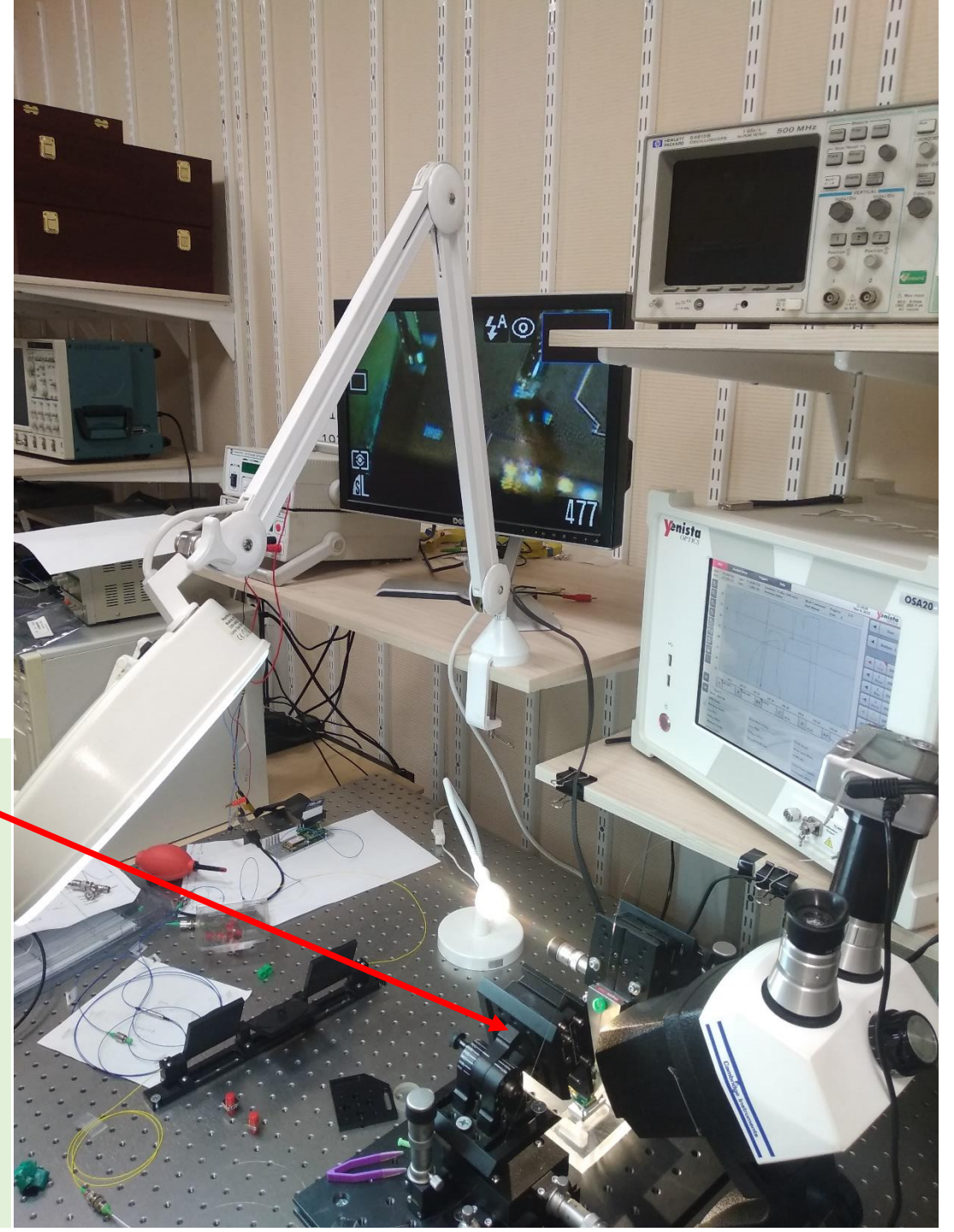
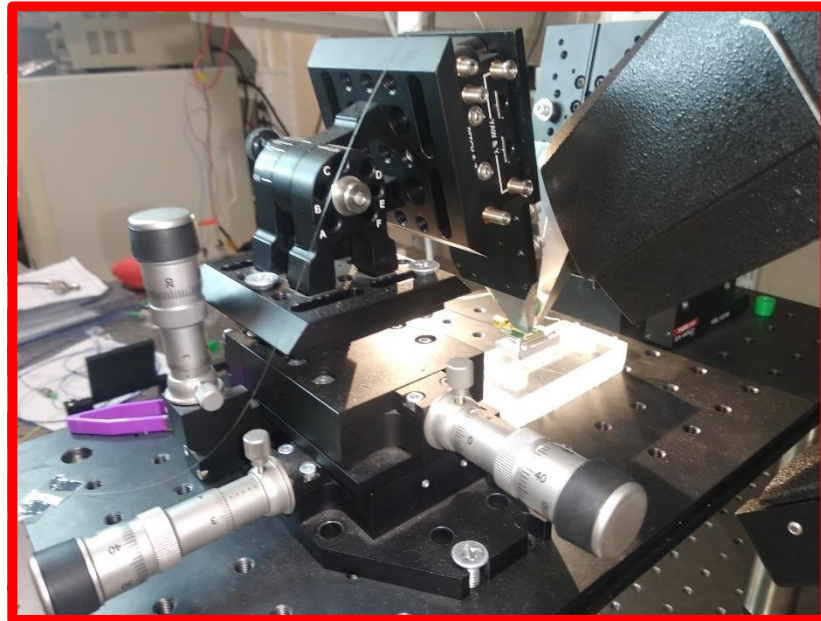


СВЧ генераторы динамического хаоса



Многоуровневые вычисления в рекурсивных нейронных сетях

Стенд центра Радиофотоники для измерения передаточных характеристик различных оптических компонент



Основные возможности центра:

- ✓ Разработка новых линейных и нелинейных элементов, приборов и устройств радиофотоники
- ✓ Исследование пассивных и активных элементов, приборов и устройств радиофотоники
- ✓ Разработка новых систем радиофотоники

Индустриальные партнеры



Спасибо за внимание!