

Ульяновская Школа по Микроволновой Фотонике, Пермь, 5-6 октября 2023

Владимир Драчев

**Лаборатория Плазмоники
Центр Инженерной Физики**

Кремниевая интегральная платформа в радиофотонике



Si интегральная фотоника

- Кремниевые технологии;

- Сложные системы на основе фотонных интегральных схем –

Фотонные приставки к АЦП;

Преобразователь Оптика\ТГц и ТГц\Электронный сигнал;

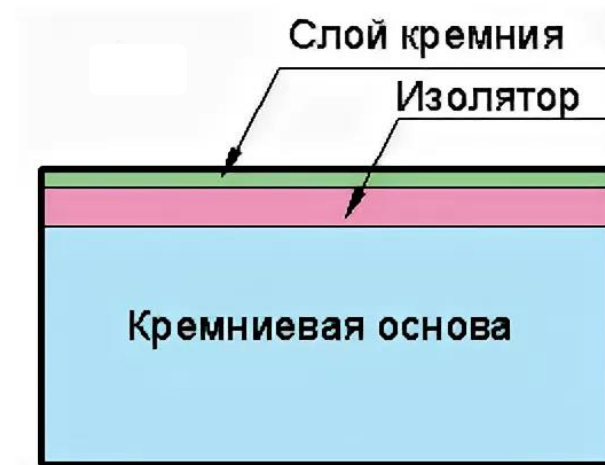
Интегральный микро-спектрометр.

- Разработка фотонных интегральных схем

в Лаборатории Плазмоники Сколтеха.

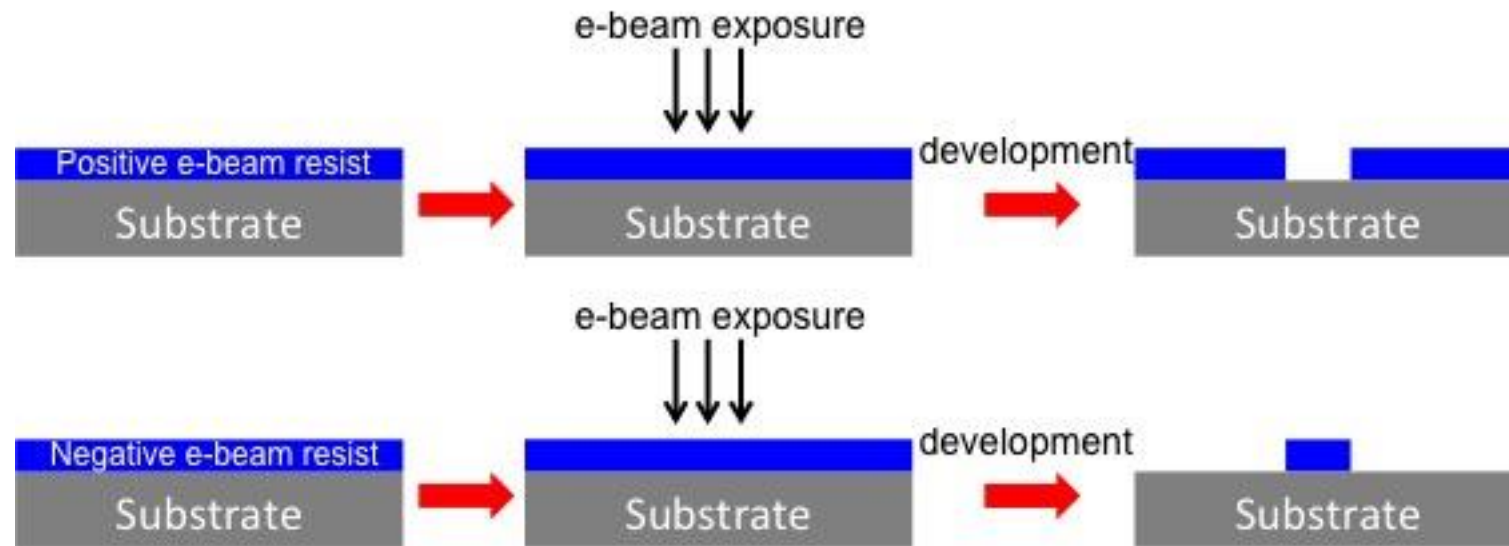
Кремниевые технологии

Кремний на изоляторе (КНИ)



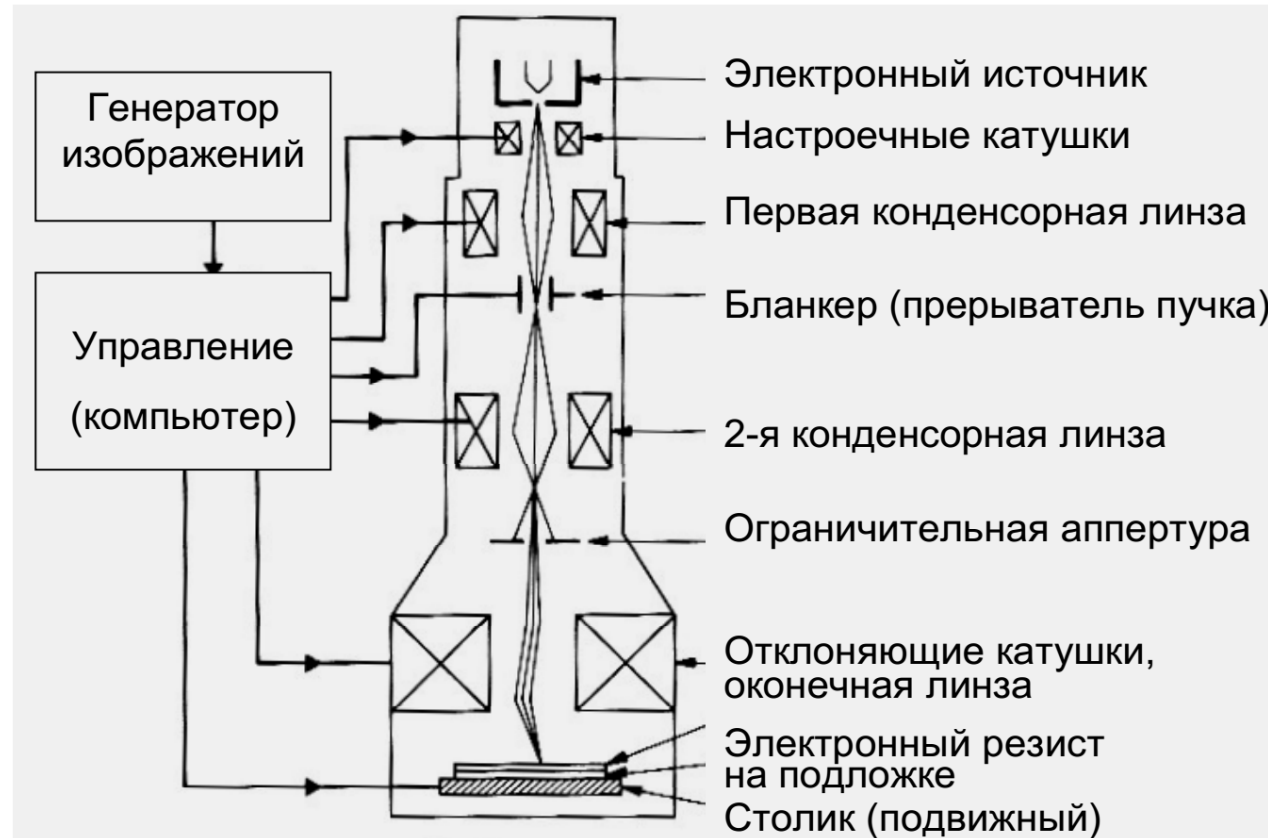
Кремниевые технологии

Электронная литография



Кремниевые технологии

Электронная литография



ФОПФ МФТИ *А.Н.Россоленко, Т.Е.Голикова, В.Н.Зверев*

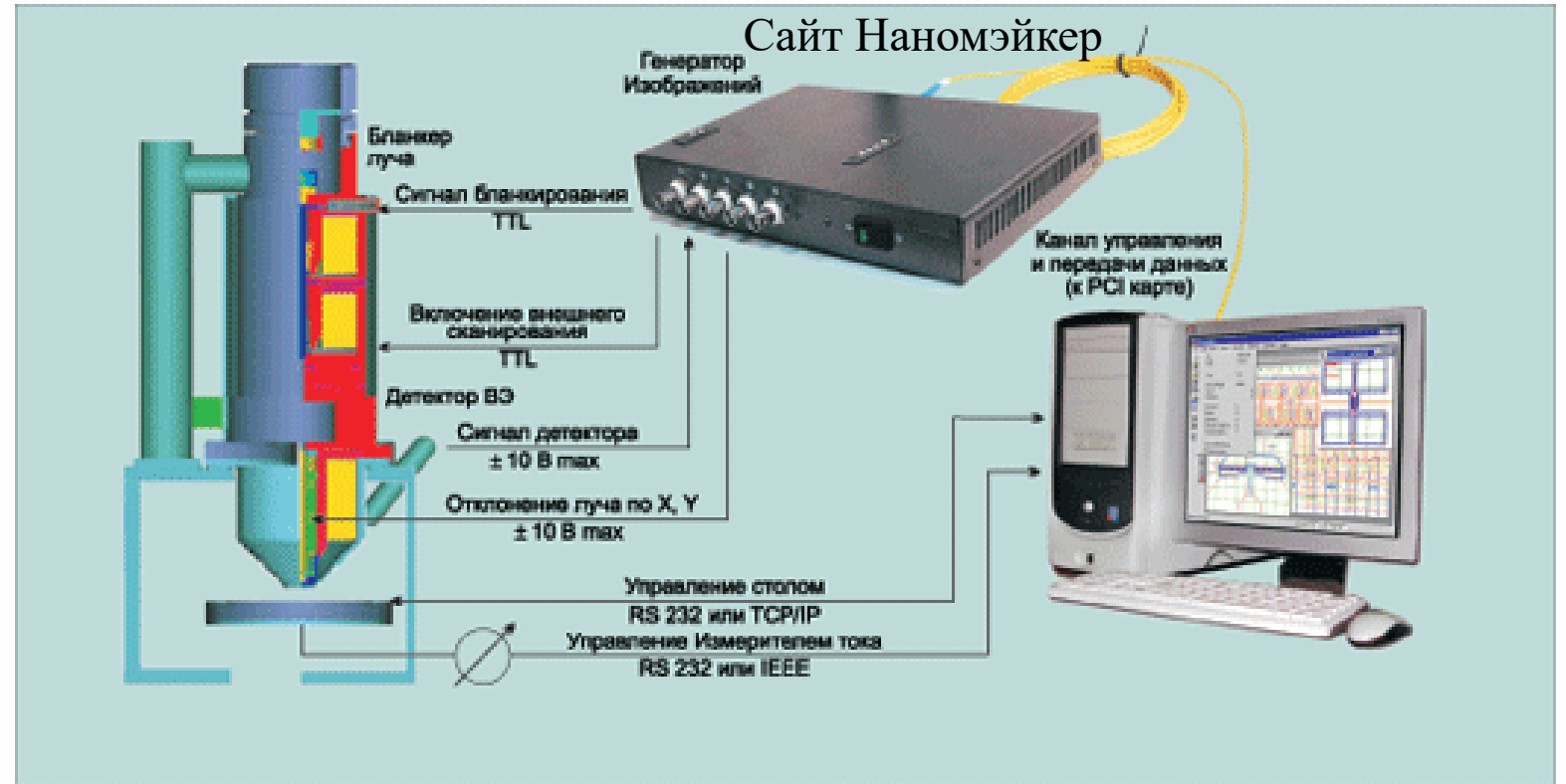
Экономичный вариант электронной литографии



Растровый электронный микроскоп + генератор изображений

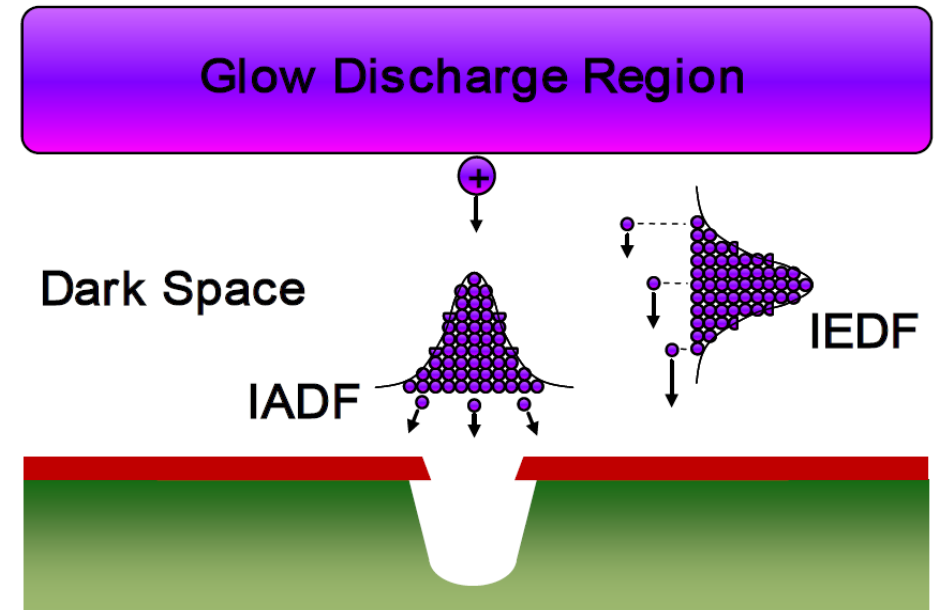
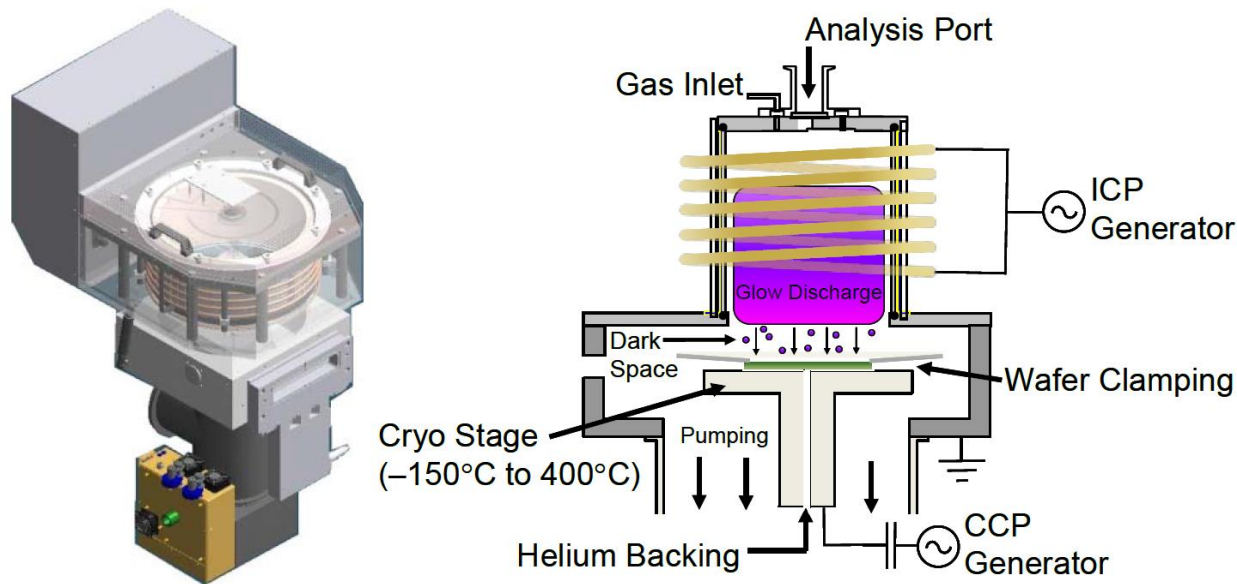
Экономичный вариант электронной литографии

External view



Растровый электронный микроскоп + генератор изображений

Индукционно связанное плазменное травление



Oxford Instruments ICPRIE

Функция распределения ионов по углам – IADF
Функция распределения ионов по энергиям - IEDF

Газ SF_6 ионы F реагируют с Si: SiF_4 откачивается

Кремниевые микро-кольцевые резонаторы

Laser Photonics Rev. 6, No. 1, 47–73 (2012) / DOI
10.1002/lpor.201100017

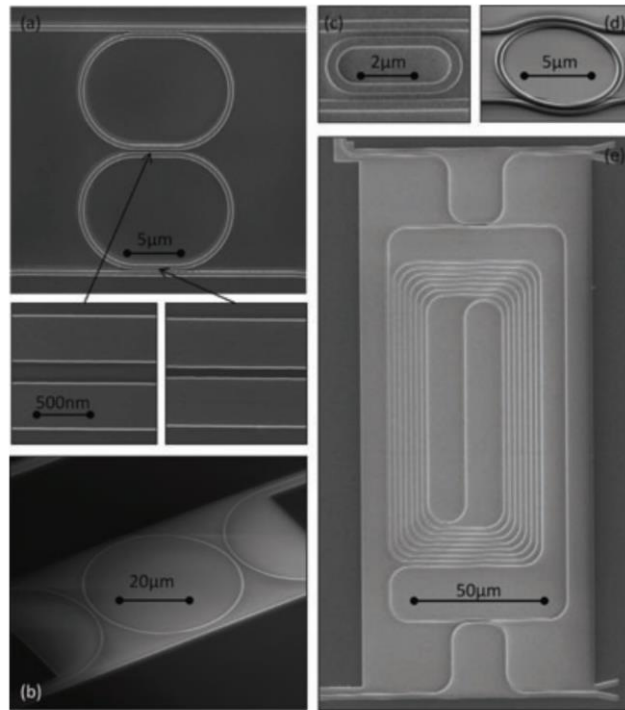
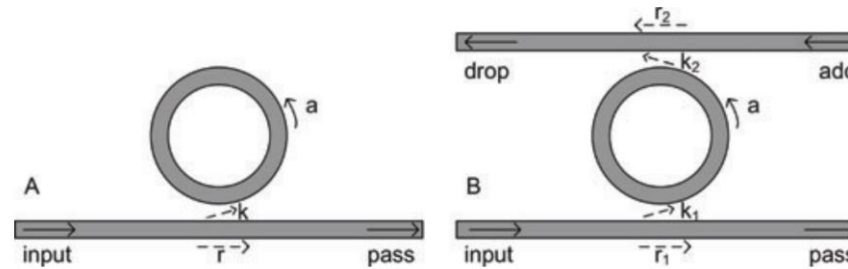


Figure 1 Examples of silicon ring resonators. (a) Double ring resonator with tuned directional coupling sections, (b) Circular ring with large coupler gaps, (c) Ultra-small racetrack ring with 1 μm bend radius, (d) ring with conformal coupling sections, (e) Large folded-spiral ring.



Выходные порты
прямой и обратный

$$\frac{E_{\text{pass}}}{E_{\text{input}}} = e^{i(\pi+\phi)} \frac{a - re^{-i\phi}}{1 - rae^{i\phi}}$$

$$a^2 = \exp(-\alpha L)$$

$$\phi = \beta L$$

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{n_{\text{eff}} L}{m}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_g L}$$

$$n_g = n_{\text{eff}} - \lambda_0 \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda}$$

k – коэффициент перекрестной связи
 r – коэффициент прямой связи
 α – коэффициент поглощения
 β – константа распространения
 Условие критической связи
 (энергия связи = потерям в кольце)
 $1 - a^2 = k^2$ or $r = a$

Область свободной дисперсии

Кремниевые микро-кольцевые резонаторы

Laser Photonics Rev. 6, No. 1, 47–73 (2012) / DOI
10.1002/lpor.201100017

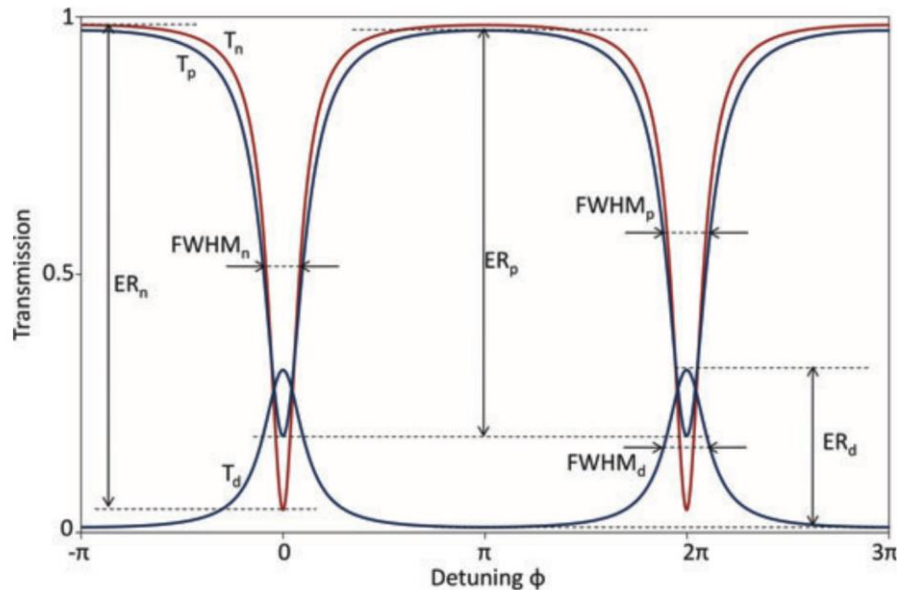
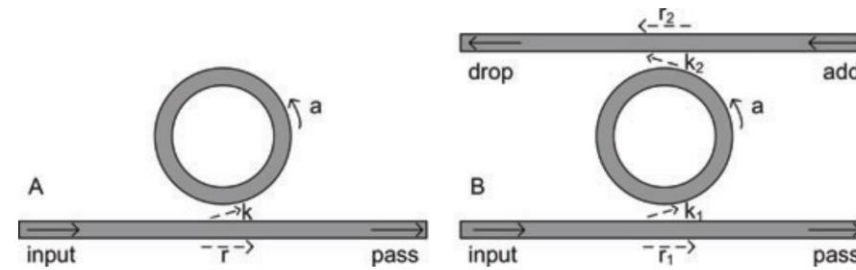


Figure 4 (online color at: www.lpr-journal.org) Transmission spectrum of an all-pass ring and the two outputs of add-drop ring with the important spectral features indicated. $a = 0.85$, $r = r_1 = r_2 = 0.9$. Because of the additional losses introduced by the second coupling section, the add-drop rings has a broader peak. Also, coupling is further from critical coupling, resulting in a smaller extinction ratio.



$$T_p = \frac{I_{\text{pass}}}{I_{\text{input}}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2},$$

$$T_d = \frac{I_{\text{drop}}}{I_{\text{input}}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2}.$$

$$\text{FWHM} = \frac{(1 - r_1 r_2 a) \lambda_{\text{res}}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}}.$$

Условие критической связи

(энергия связи = потерям в кольце)

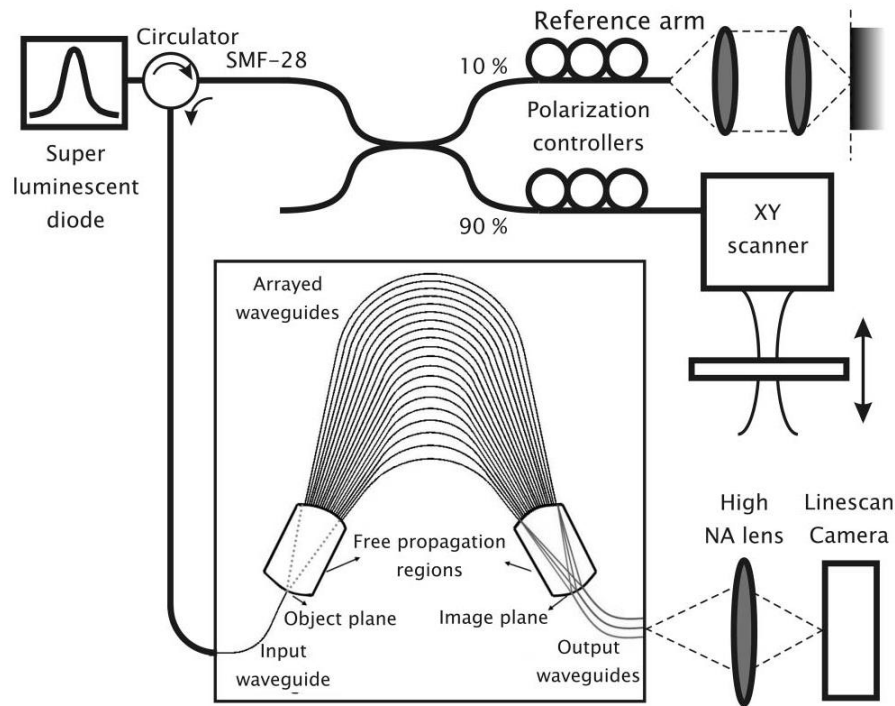
$$r_2 a = r_1$$

Минимум если
длина волны соответствует
 $\cos \phi = 1$,
Максимум в обратном порте

AWG – упорядоченная волноводная решетка

Nguyen et al. April 1, 2011 / Vol. 36, No. 7 / OPTICS LETTERS

Spectral domain optical coherence tomography imaging with an integrated optics spectrometer

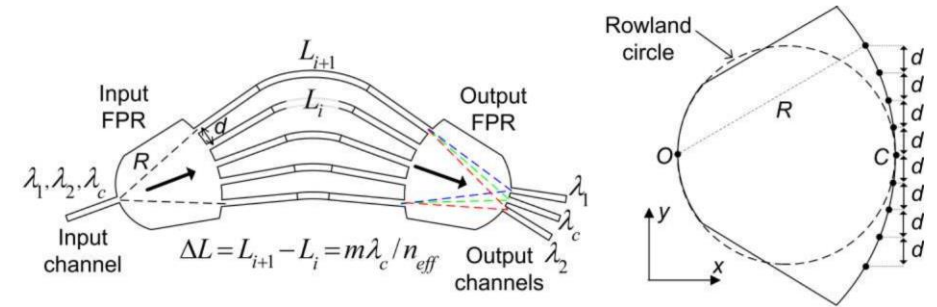


$$\Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_{eff}}$$

$$\Delta\phi_1 = \beta \Delta L$$

$$\beta = 2\pi \frac{n_{eff}}{\lambda}$$

$$\Delta\phi_1 = 2\pi \Delta L \left(\frac{n_{eff}}{\lambda} \right)$$

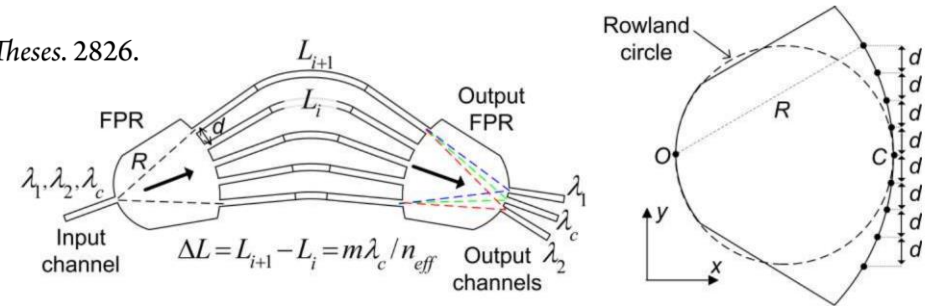


AWG – упорядоченная волноводная решетка

AWG – упорядоченная волноводная решетка

Chen, Xiangfeng, "Designs and Fabrications On Array Waveguide Gratings for Hybrid Integration" (2018). *All Theses*. 2826.
https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2826

Platform	Cross-section ($\mu m * \mu m$)	Channel Number	Channel Spacing(GHz)	Insertion Loss(dB)	Cross talk(dB)	Footprint (mm * mm)
GeO2/SiO2	6*6	16	100	-1	-40	26*21
	0.75%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	16	100	0.7 0.9	-40	16*16
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	400	25	3.8 6.4	-24	120*60
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	1010	10	-13	-24	-
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	1080	25	-4.5	-24	-
	1.5%					
InGaAsP	1.7*0.5	4	400	-5	-24	0.23*0.33
SOI	0.22*0.5	16	200	-2.2	-20	0.5*0.2
SOI	0.22*0.45	8	400	-1.1	-25	0.2*0.35
Si3N4	0.22*0.9	12	2nm@892	-1.2	-16.9	0.34mm ²
SiON	2*0.52	41	5.5nm@881	-1.1	-20	340mm ²



$$\Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_{eff}}$$

$$\Delta \phi_1 = \beta \Delta L$$

$$\beta = 2\pi \frac{n_{eff}}{\lambda}$$

$$\Delta \phi_1 = 2\pi \Delta L \left(\frac{n_{eff}}{\lambda} \right)$$

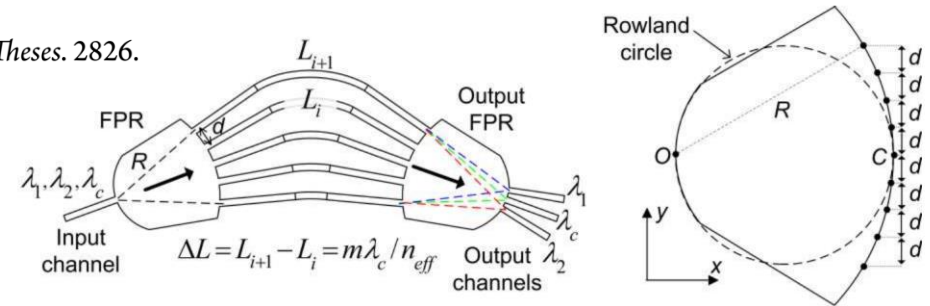
AWG – упорядоченная волноводная решетка

AWG – упорядоченная волноводная решетка

Chen, Xiangfeng, "Designs and Fabrications On Array Waveguide Gratings for Hybrid Integration" (2018). *All Theses*. 2826.
https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2826

Platform	Cross-section ($\mu m * \mu m$)	Channel Number	Channel Spacing(GHz)	Insertion Loss(dB)	Cross talk(dB)	Footprint ($mm * mm$)
GeO2/SiO2	6*6	16	100	-1	-40	26*21
	0.75%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	16	100	0.7 0.9	-40	16*16
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	400	25	3.8 6.4	-24	120*60
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	1010	10	-13	-24	-
	1.5%					
GeO2/SiO2	4.5*4.5	1080	25	-4.5	-24	-
	1.5%					
InGaAsP	1.7*0.5	4	400	-5	-24	0.23*0.33
SOI	0.22*0.5	16	200	-2.2	-20	0.5*0.2
SOI	0.22*0.45	8	400	-1.1	-25	0.2*0.35
Si3N4	0.22*0.9	12	2nm@892	-1.2	-16.9	0.34mm ²
SiON	2*0.52	41	5.5nm@881	-1.1	-20	340mm ²

AWG – упорядоченная волноводная решетка



$$\Delta L = m \frac{\lambda_c}{n_{eff}}$$

$$\Delta \phi_1 = \beta \Delta L$$

$$\beta = 2\pi \frac{n_{eff}}{\lambda}$$

$$\Delta \phi_1 = 2\pi \Delta L \left(\frac{n_{eff}}{\lambda} \right)$$

Показ прел dn/dT

Si (SOI)	3.4	$20 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
GeO2	1.65	$5.32 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 0.01 дБ/см
Si3N4	2.1	$2.51 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
SiON	1.83	$1.84 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Интерферометр Маха-Цандера на КНИ

IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 12, NO. 6, JUNE 2000

CMOS Compatible Fully Integrated Mach-Zehnder Interferometer in SOI Technology

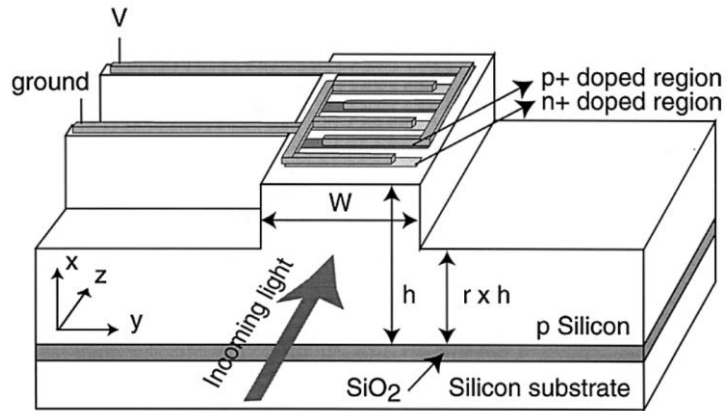


Fig. 1. SOI rib waveguide. Schematic view of the presented phase modulator with longitudinal contacts integrated on top of the waveguide rib.

$$Q = \frac{kA\Delta T}{h}$$

Q is the power dissipated in the waveguide;
 k is thermal conductivity;
 h is the waveguide height;
 A is the area of the cross section;
 ΔT is the temperature variation.

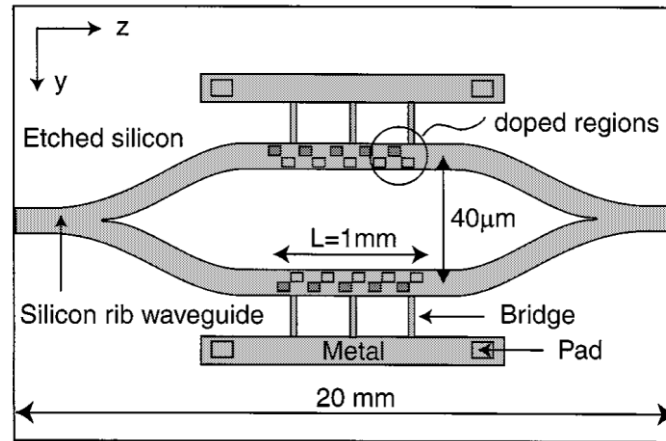


Fig. 2. Schematic top view of the fully integrated Mach-Zehnder interferometer achieved in this work. Electronics are integrated on both arms of the modulator to allow push-pull operation.

$$J = \frac{\Delta N q d}{t_{\text{eff}}}$$

t_{eff} is the average lifetime of charges (50 ns);
 q is the elementary charge unit;
 d is the distance between the diode doped regions.

p+-intrinsic-n+ (PiN diode)

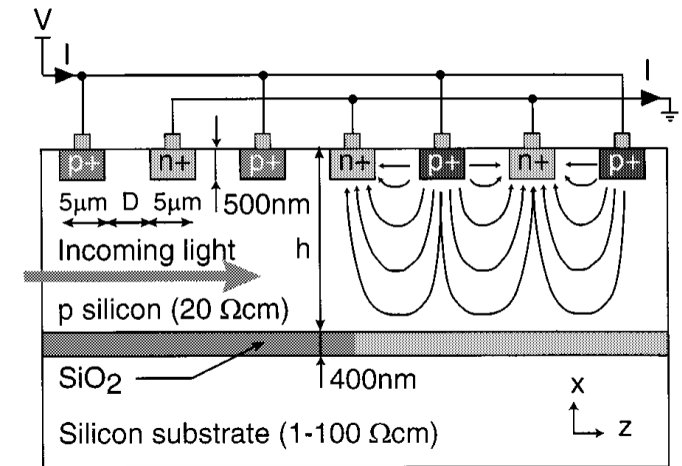


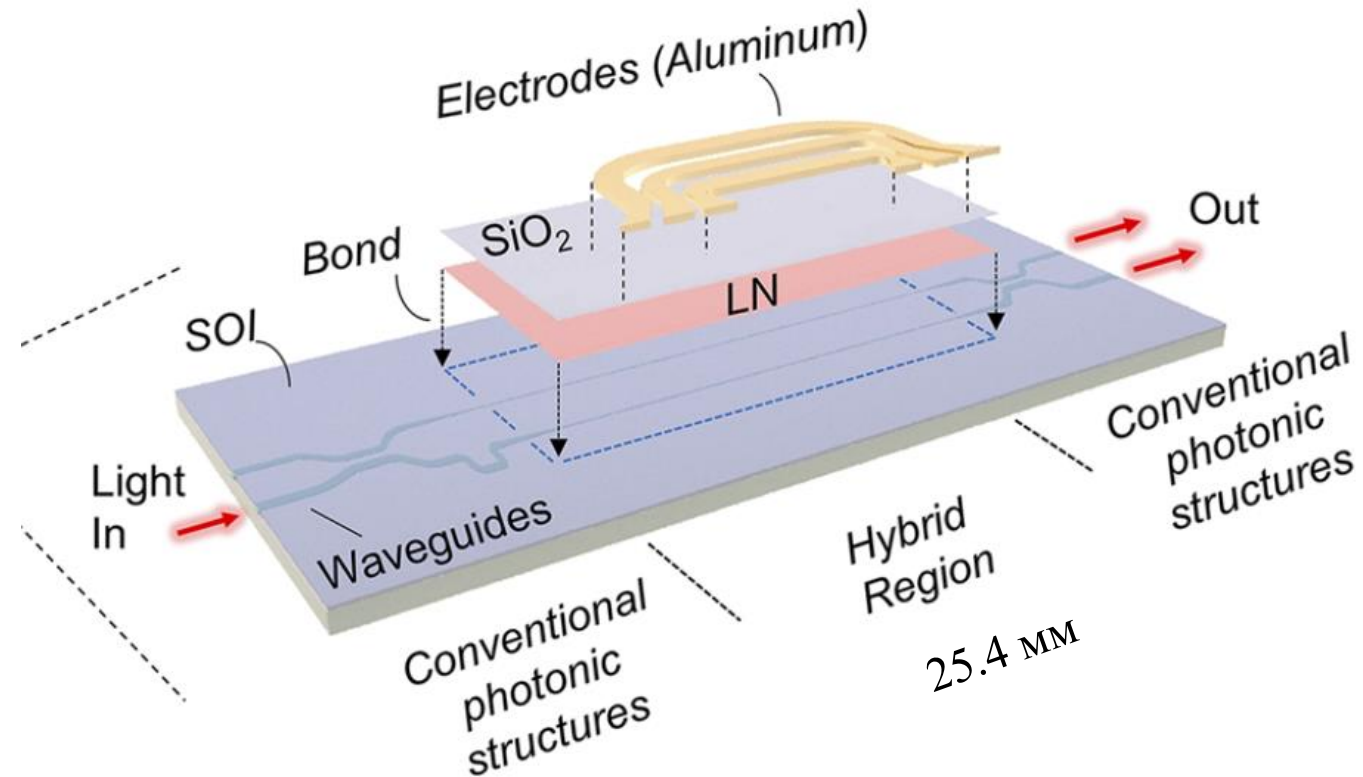
Fig. 3. Cut view along the section of the phase modulator waveguide. Integrated doped regions and current flow are indicated.

$$\Delta n = 6.2 \cdot 10^{-22} \Delta N_e + 6 \cdot 10^{-18} \Delta N_h^{0.8}$$

$$\eta_{\text{plasma, th}} = \frac{\pi}{I_{\text{tot}} L} = 7.36\pi \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

Achieving beyond-100-GHz large-signal modulation bandwidth in hybrid silicon photonics Mach Zehnder modulators using thin film lithium niobate

Wang et al. APL Photonics **4**, 096101 (2019)



Фотонные АЦП

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

Р.С. Стариков –

Фотонные Аналого-Цифровые-Преобразователи – сложнофункциональные радиофотонные устройства в интегральном исполнении

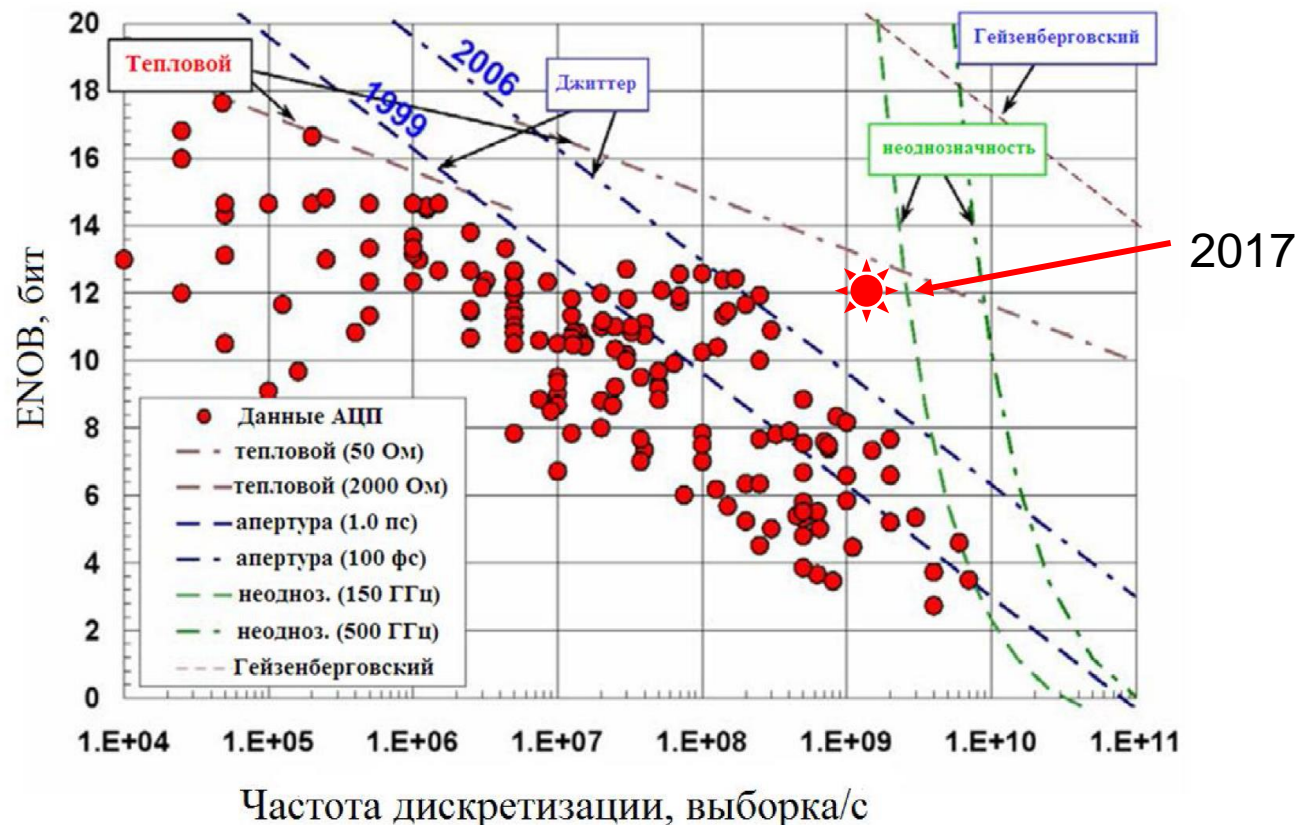
1

Фундаментальные ограничения электронных АЦП

Effective number of bits (ENOB):

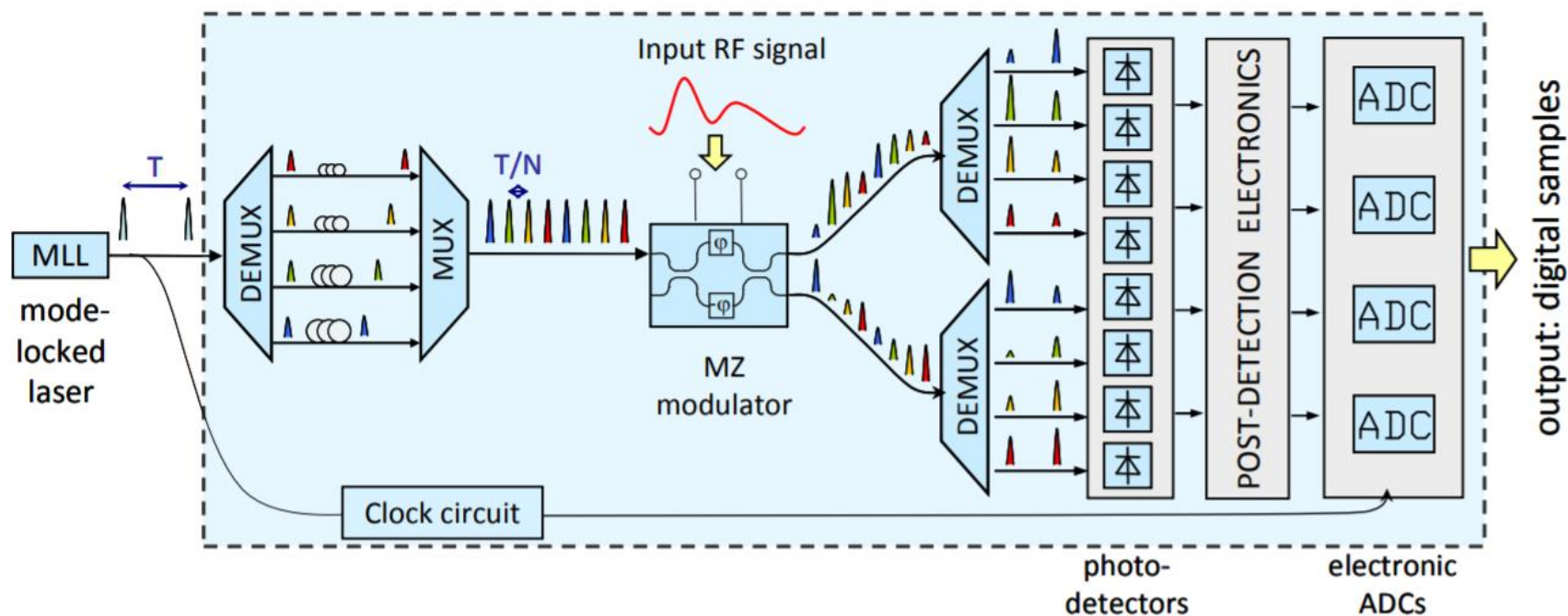
Мера динамического диапазона АЦП –
разрядность

- Разрядность двоичного АЦП 12 бит:
 $2^{12} = 4096$ уровней квантования;
- Разрешение двоичного АЦП по напряжению:
 $(10\text{В}-0)/4096 = 0,00244 \text{ В} = 2,44 \text{ мВ}$



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.

Фотонные приставки для РФ АЦП



*Anatol Khilo et al / "Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter," *Opt. Express* 20, 4454-4469 (2012)

«Успехи современной радиоэлектроники», 2015 г., № 2

Р.С. Стариков, Фотонные АЦП

Схема и параметры радиофотонных приставок АЦП: от дискретной реализации к интегральной

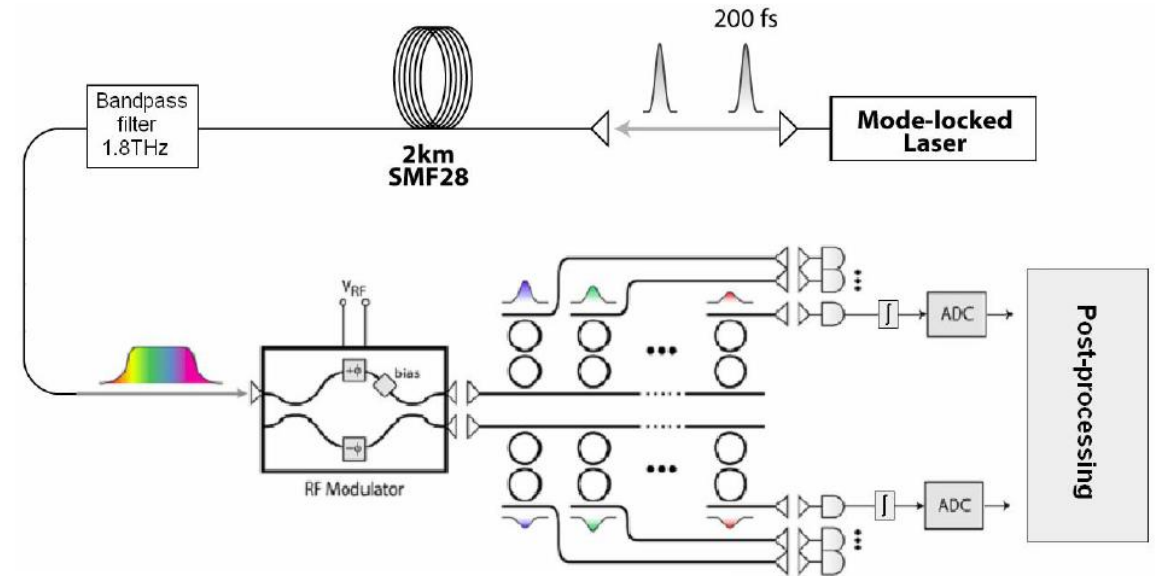
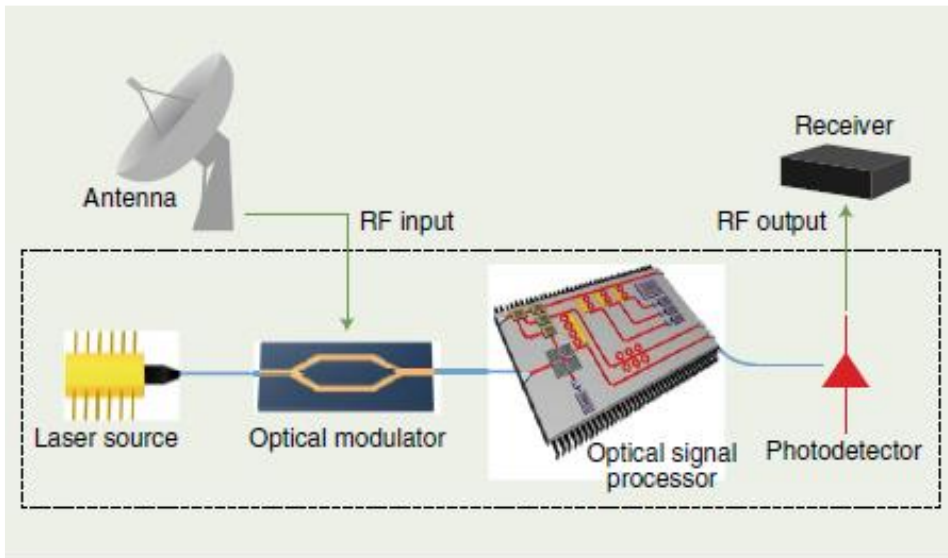


Table 1: Summary of system parameters for overall sampling rates of 40 or 100 GSa/sec.

Overall Sampling Rate $f_s = 1/T_s$	Laser Rep. Rate $f_R = 1/T_R$	Filter Bandwidth	Channel Spacing Δf	Number of Filters N	Total Optical Bandwidth	Resolution $\Delta V/V$	Max. Jitter Δt	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

Фотонные приставки для РФ АЦП

1

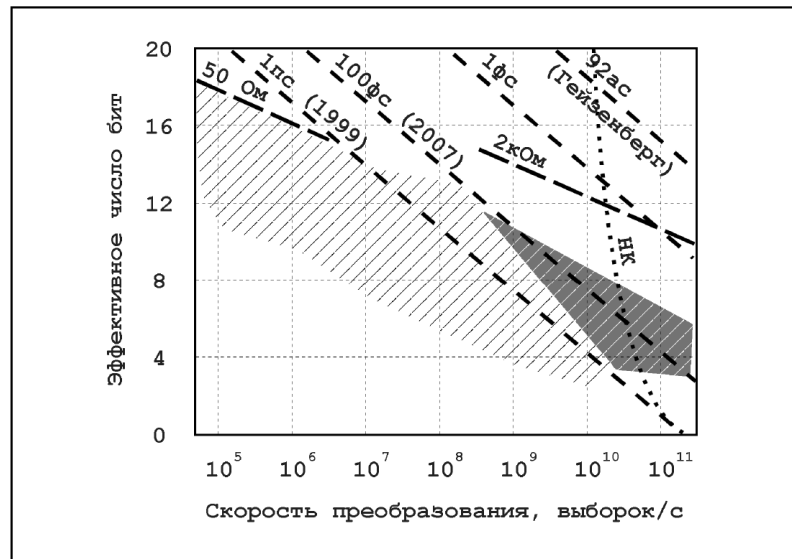


Рис. 1. «График Уолдена»: зависимость «эффективное число бит – скорость преобразования», по данным [1-3,8,14-16]. Заштрихованные области соответствуют достигнутым характеристикам преобразования – светлая штриховка электронные АЦП, темная – ФАЦП. Длинный пунктир – тепловые ограничения (для систем 50 Ом и 2 кОм), короткий пунктир – ограничения, определяемые апертурной ошибкой, НК – ограничения, определяемые неопределённостью компараторов (500 ГГц)

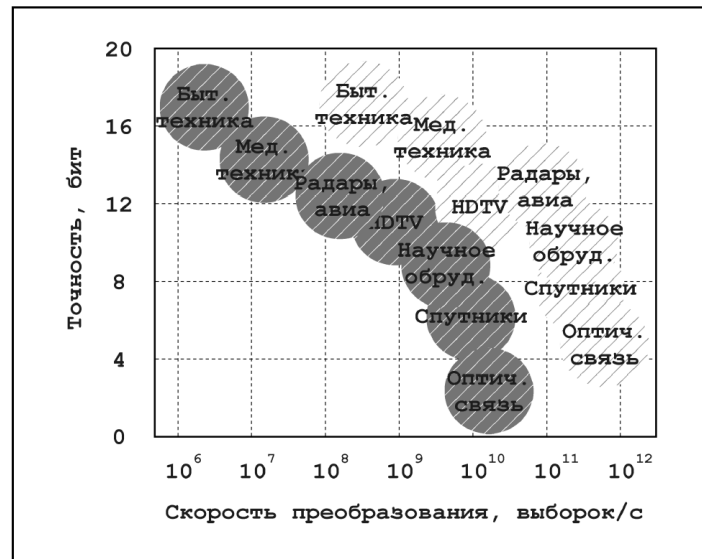


Рис. 2. Графическое представление роста потребностей в точности и скорости аналого-цифрового преобразования темная штриховка в настоящее время, светлая – к 2025 г. [1–3,7 и др.]

«Успехи современной радиоэлектроники», 2015 г., № 2

Р.С. Стариков, Фотонные АЦП

2 THz: O/T and T/E преобразователи для 6G поколения беспроводной связи

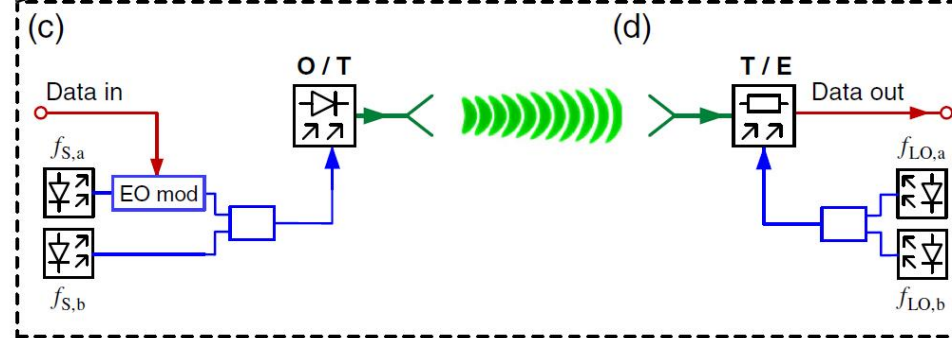
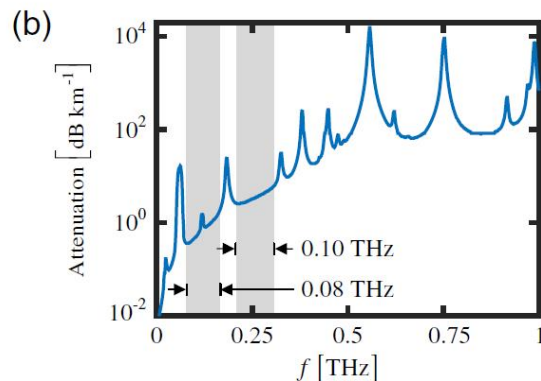
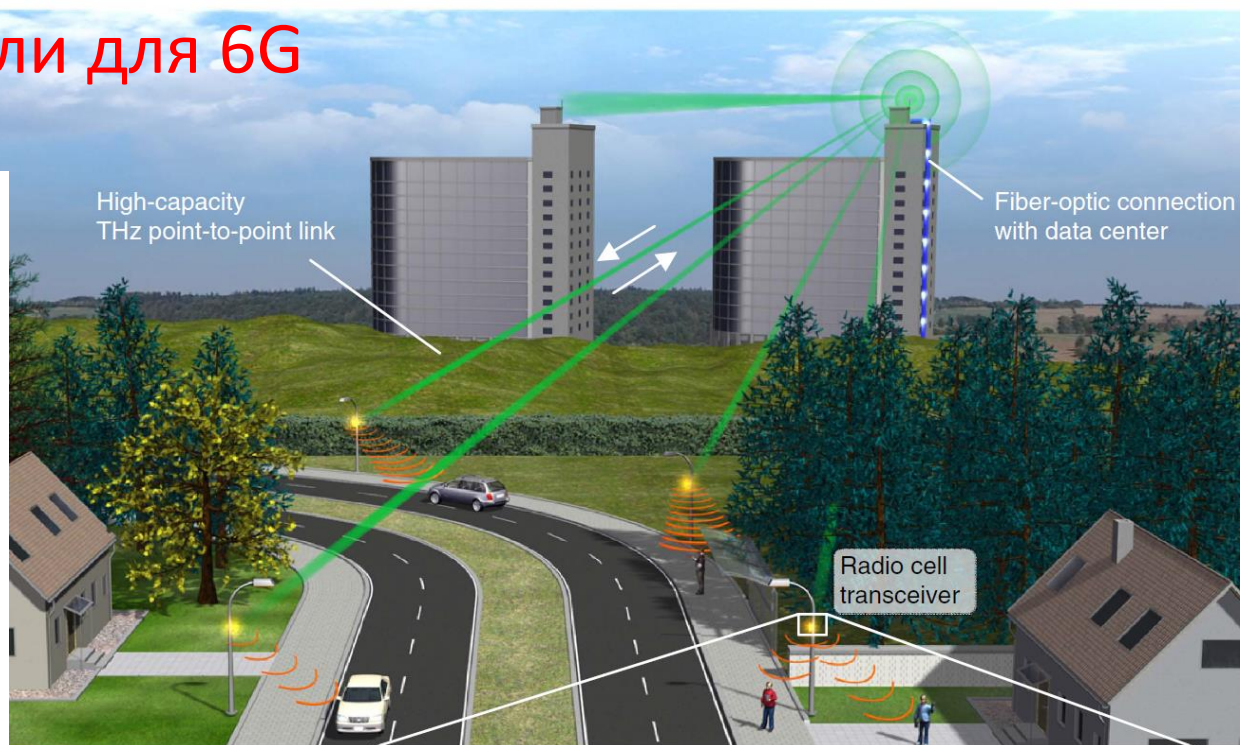
(a)



Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver

TOBIAS HARTER,^{1,2} SANDEEP UMMETHALA,^{1,2} MATTHIAS BLAICHER,^{1,2} SASCHA MUEHLBRANDT,^{1,2} STEFAN WOLF,¹ MARCO WEBER,¹ MD MOSADDEK HOSSAIN ADIB,¹ JUNED. N. KEMAL,¹ MARCO MERBOLDT,¹ FLORIAN BOES,³ SIMON NELLEN,⁴ AXEL TESSMANN,⁵ MARTIN WALTHER,⁵ BJÖRN GLOBISCH,⁴ THOMAS ZWICK,³ WOLFGANG FREUDE,¹ SEBASTIAN RANDEL,¹ AND CHRISTIAN KOOS^{1,2,*}

¹Institute of Photonics and Quantum Electronics (IPQ), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany
²Institute of Microstructure Technology (IMT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany
³Institute of Radio Frequency Engineering and Electronics (IHE), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany
⁴Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich Hertz Institute (HHI), 10587 Berlin, Germany
⁵Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics (IAF), 79108 Freiburg, Germany
 *Corresponding author: christian.koos@kit.edu

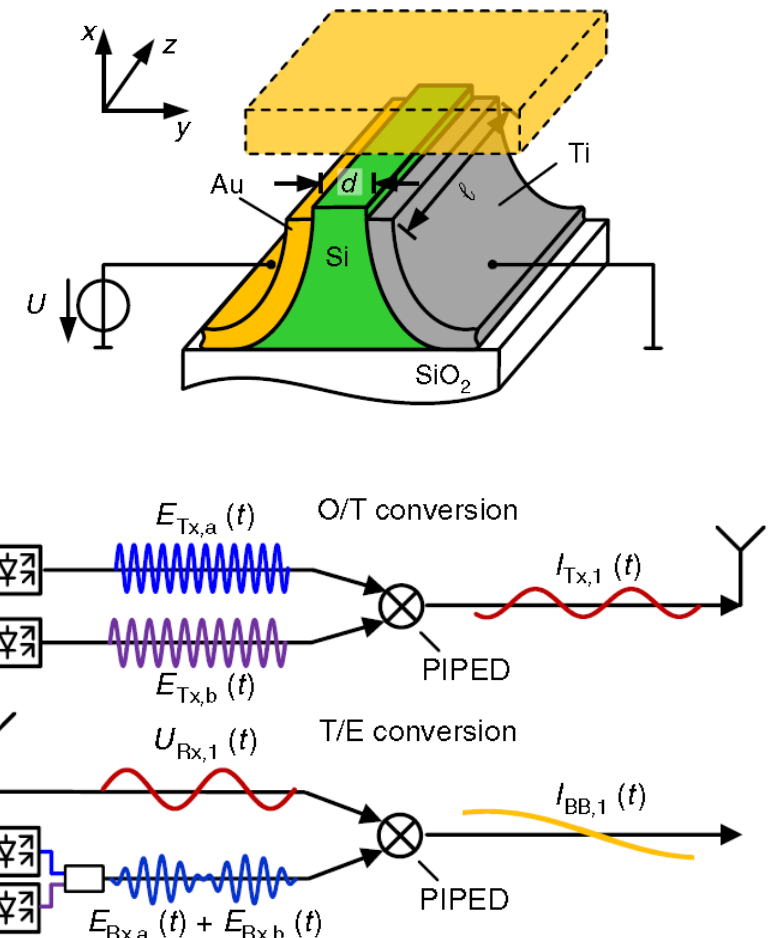
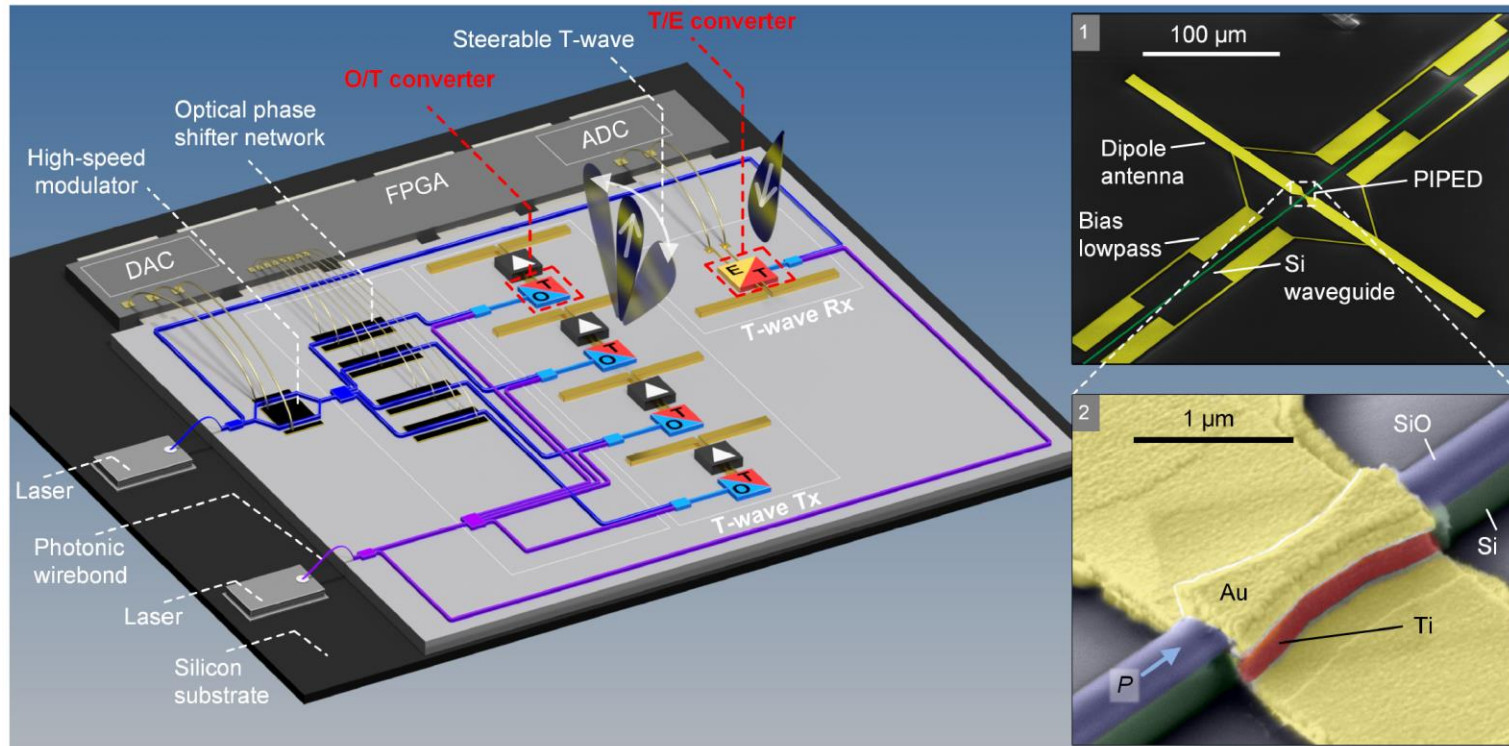


Silicon-plasmonic integrated circuits for terahertz signal generation and coherent detection

T. Harter^{1,2*}, S. Muehlbrandt^{1,2}, S. Ummethala^{1,2}, A. Schmid¹, L. Hahn², W. Freude¹, C. Koos^{1,2**}

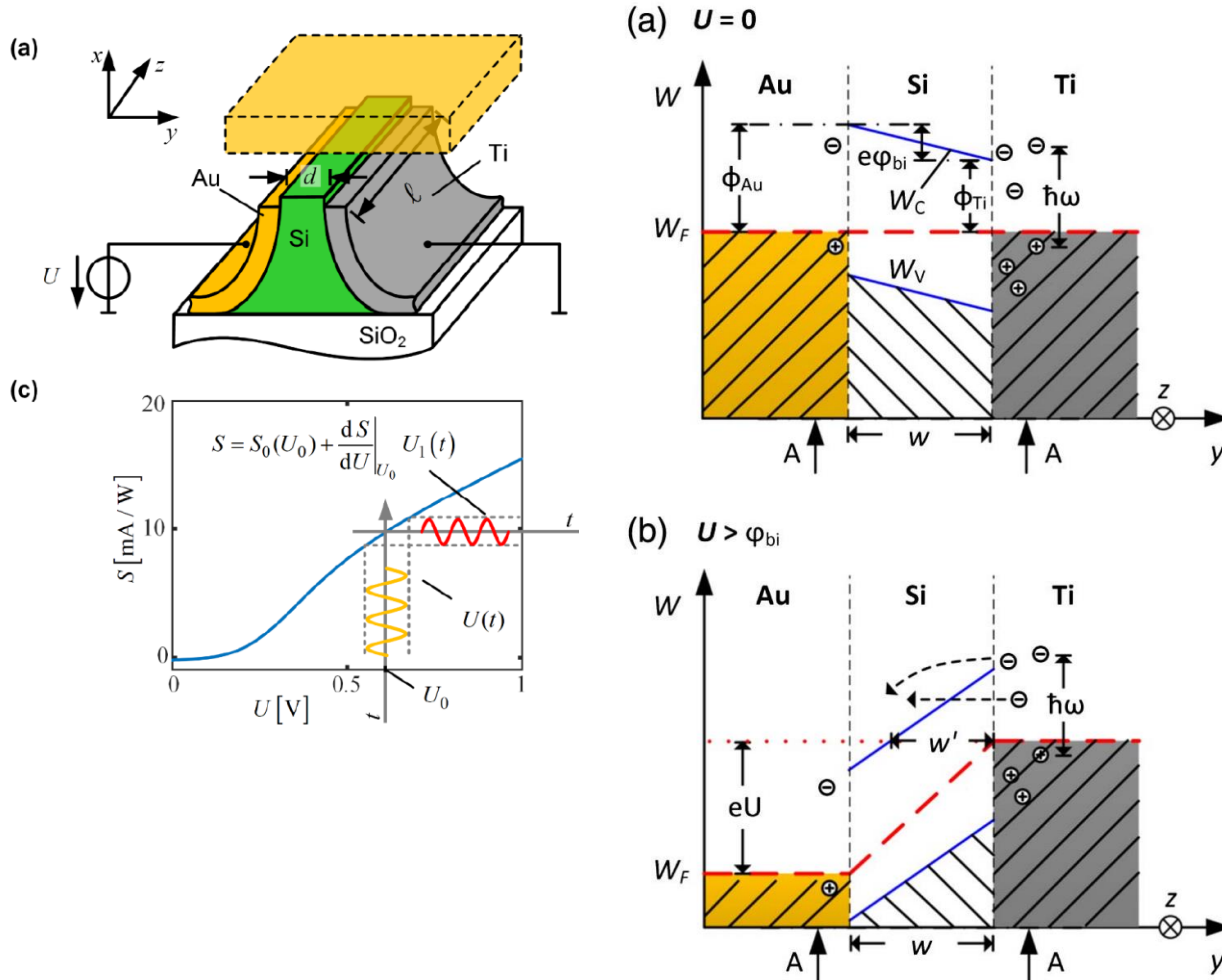
¹Institute of Photonics and Quantum Electronics (IPQ), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany

²Institute of Microstructure Technology (IMT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76131 Karlsruhe, Germany



THz O/T and T/E conversion review

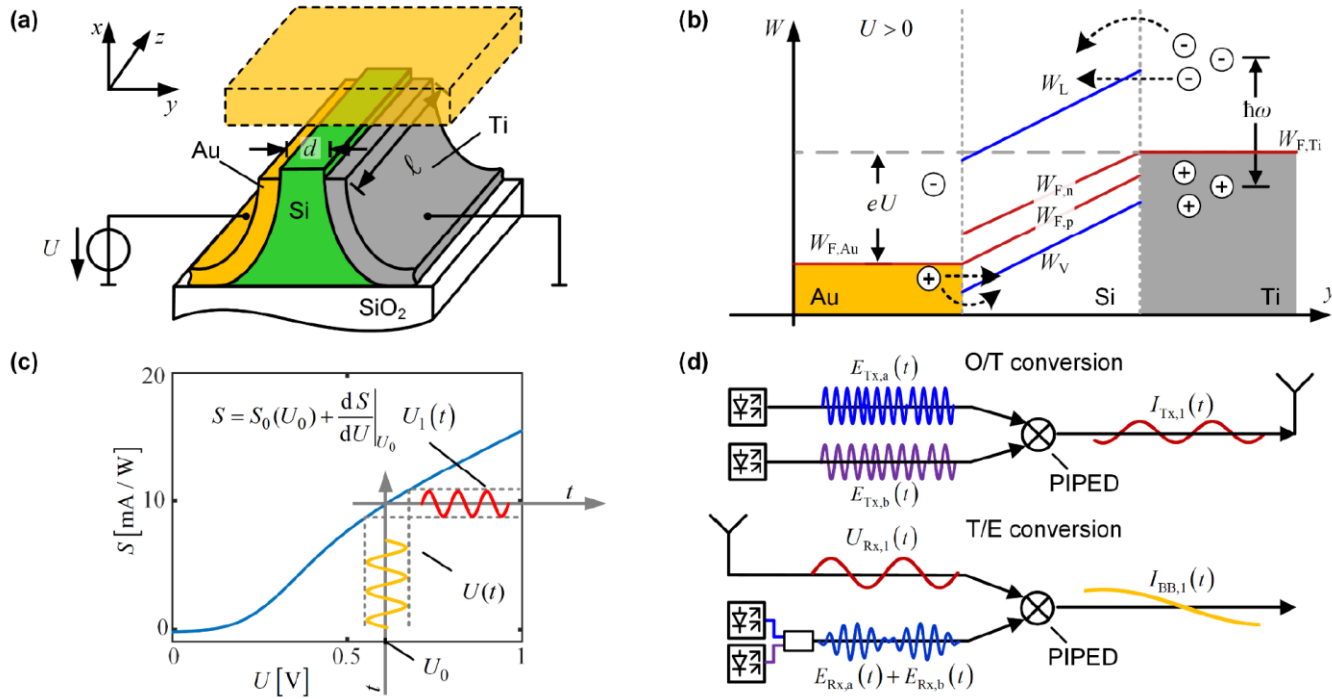
NATURE PHOTONICS | VOL 12 | OCTOBER 2018 | 625-633 | www.nature.com/naturephotonics



Выводы:

1. Ключевые физические процессы изучались активно последние 20 лет :
 - плазмоны 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.
2. Кремнивая технология применима для реализации гибридных плазмон-поляритонных ТГц фотонных интегральных схем.
3. Наши компетенции охватывают все компоненты необходимые для реализации проекта.

THz O/T and T/E conversion review

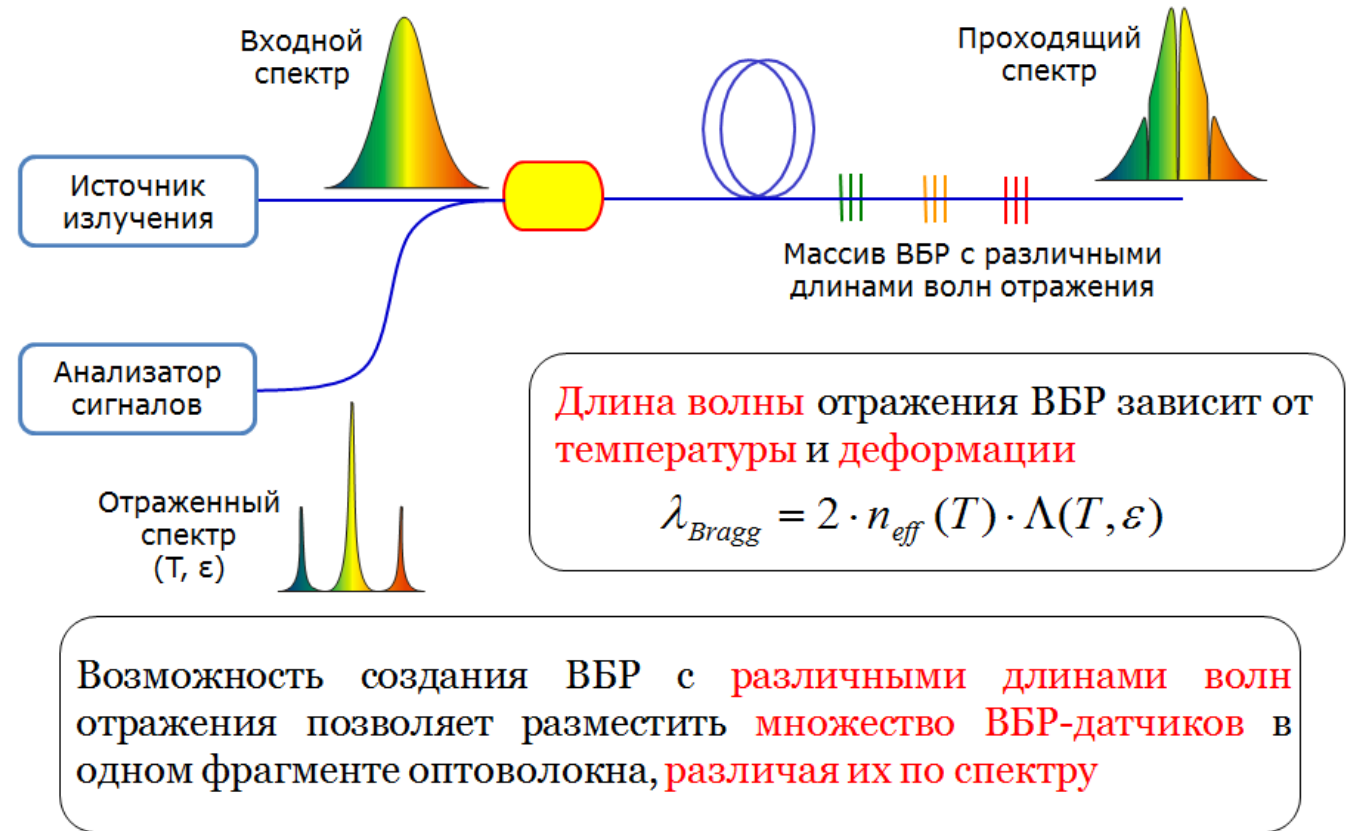


Выводы:

1. Ключевые физические процессы изучались активно последние 20 лет :
 - плазмоны 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.
2. Кремнивая технология применима для реализации гибридных плазмон-поляритонных ТГц фотонных интегральных схем.
3. Наши компетенции охватывают все компоненты необходимые для реализации проекта.



Оптоволоконные сенсоры на Брэгговских Решетках

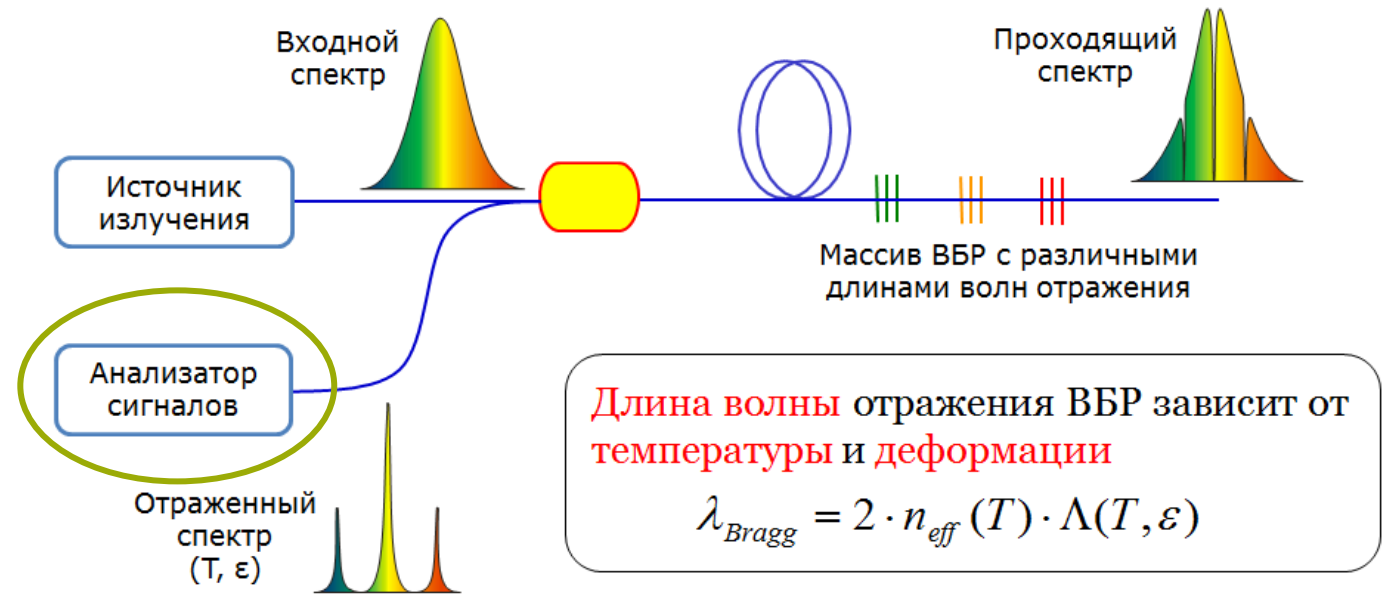


Проект направлен на разработку системы мониторинга качества и безопасного использования изделий («умные» материалы).

Центр Инженерной Физики
 Центр Технологии Материалов

Оптоволоконные сенсоры на Брэгговских Решетках

Si - Фотонные интегральные схемы:
 -Компактность;
 -Технологичность изготовления всей системы в одной линии.



Возможность создания ВБР с различными длинами волн отражения позволяет разместить множество ВБР-датчиков в одном фрагменте оптоволокна, различая их по спектру

Проект направлен на разработку системы мониторинга качества и безопасного использования изделий («умные» материалы).

Лаборатория плазмоники

Центр инженерной физики



Владимир Драчев, д.ф.-м.н.,
Профессор, Рук.
Лаборатории,
Директор Центра



Сергей Косолюбов,
д.ф.-м.н.,
Доцент



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



Иван Пшеничнюк,
к.ф.-м.н.,
ведущий
научный
сотрудник



Константин Гарбузов,
Инженер
исследователь



Анастасия Земцова,
м.н.с.



Даниил Земцов,
м.н.с.



Лиза Кожина,
аспирант



Мария Погодаева,
Аспирант



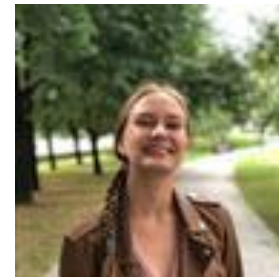
Артур Нелюбов,
аспирант



Павел Кусов,
м.н.с.



Камиль Тазиев,
аспирант



Александра Вергулес,
магистрант



Александр Смирнов, Инженер
исследователь,
аспирант

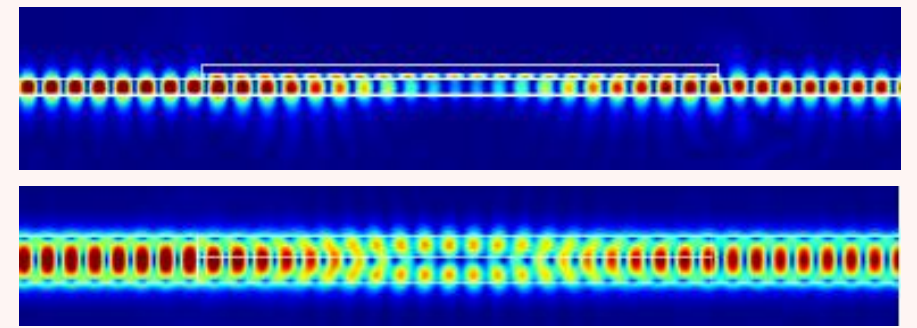
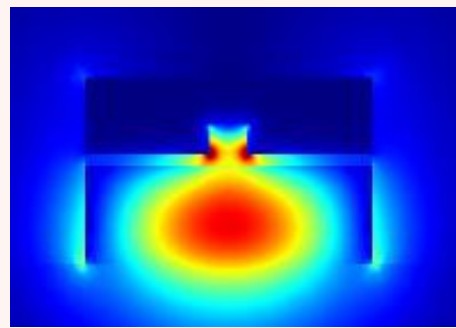
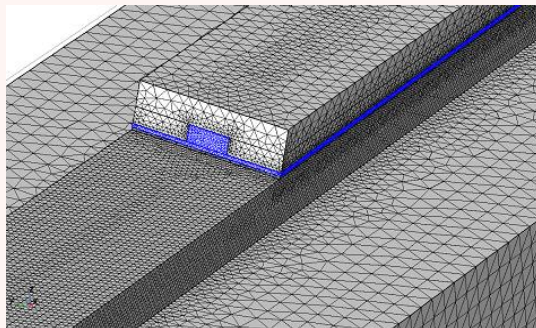


Андрей Целин,
магистрант



Численное моделирование

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

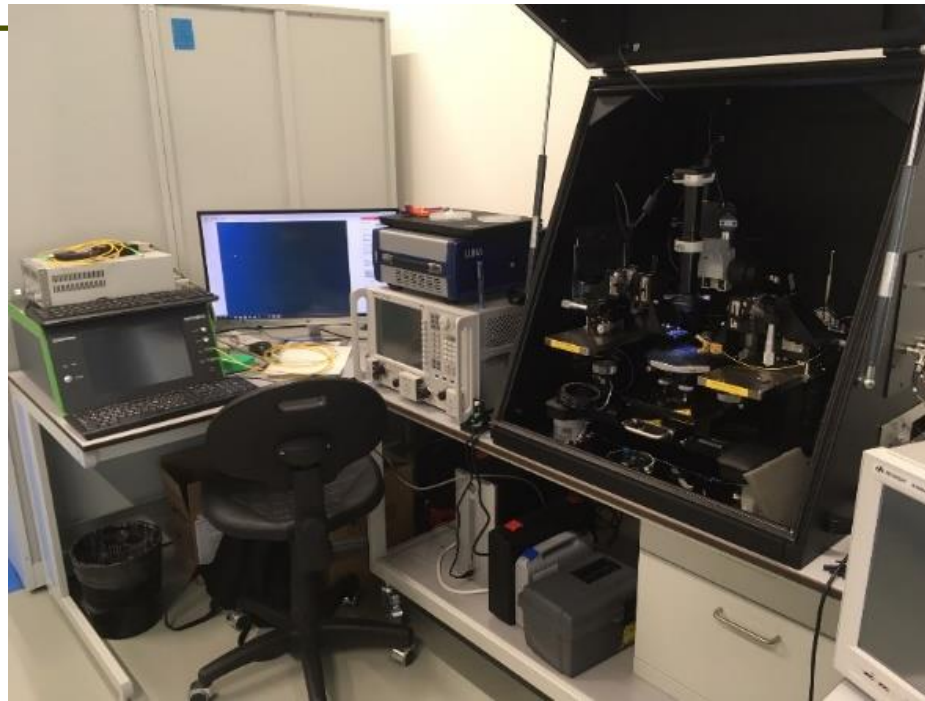




**Фотонные Интегральные Схемы:
полный цикл в одной лаборатории
Расчеты-Разработка технологии-
Изготовление-Тестирование-
Передача технологии
промышленности**

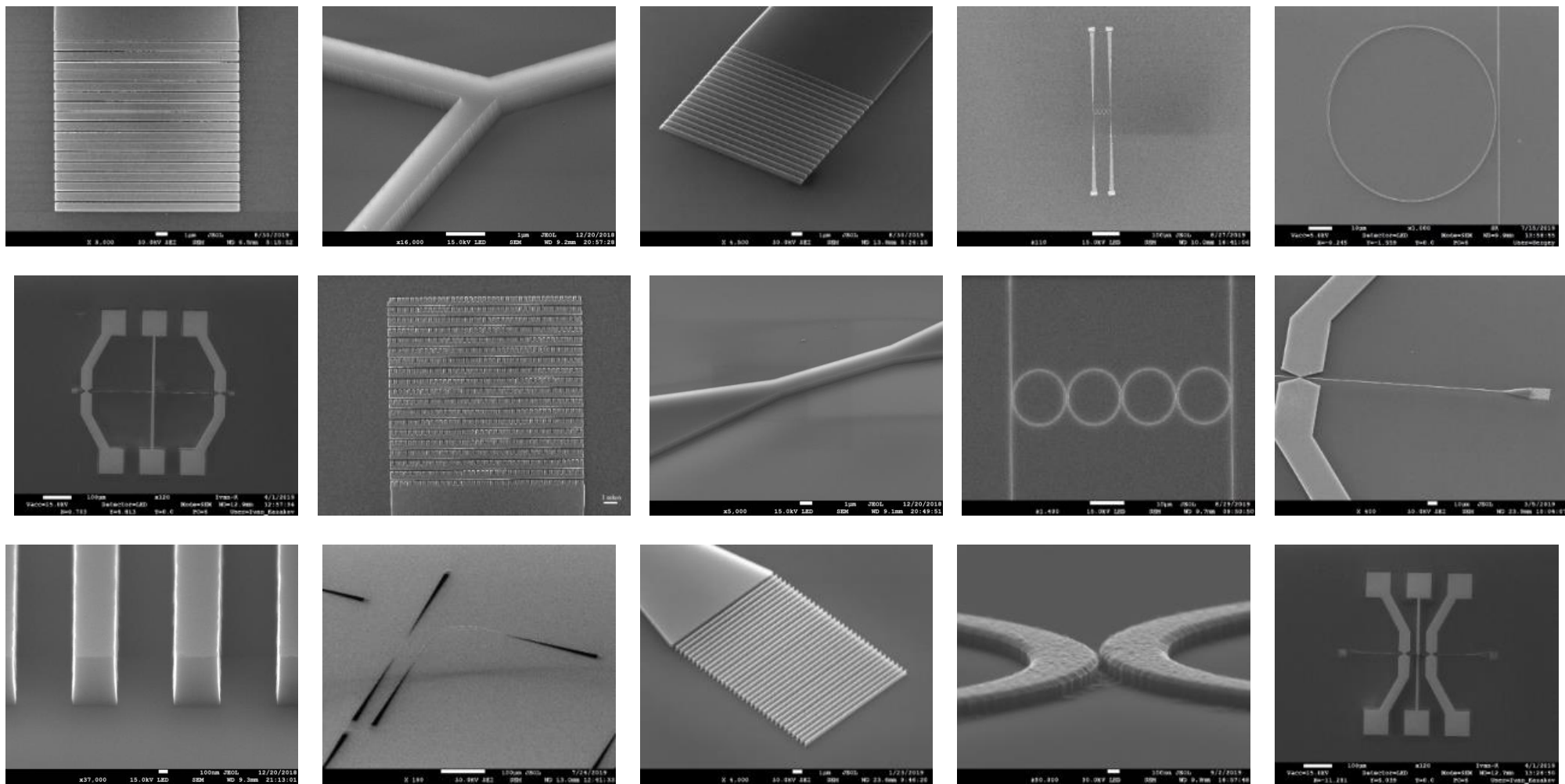
1. Чистая комната ИСО-6
2. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Jeol JSM 7200F с генератором изображений Xenos XPG.
3. Индукционно-связанное-плазменное травление ICP Oxford Plasma Pro 100

Лаборатория Плазмоники Центр Инженерной Физики

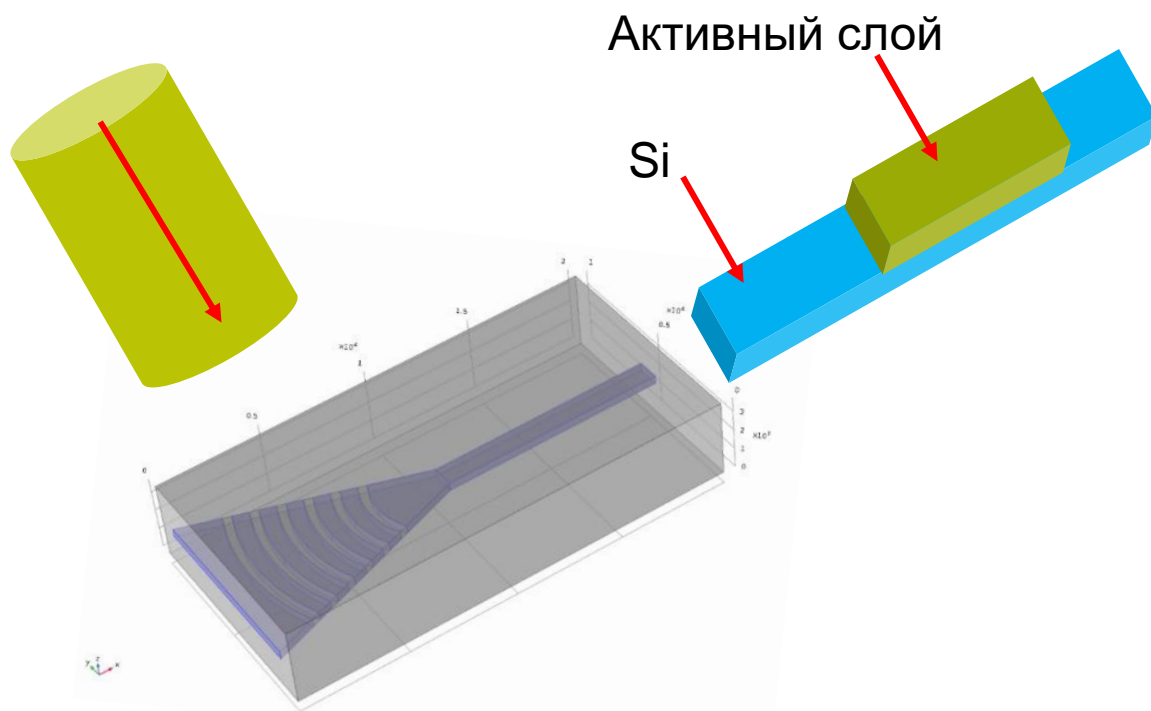


1. Электронно-лучевая установка напыления металлов и диэлектриков Angstrom Nexdep.
2. Зондовая станция с параметрическим векторным анализатором и оптическим анализатором спектра.

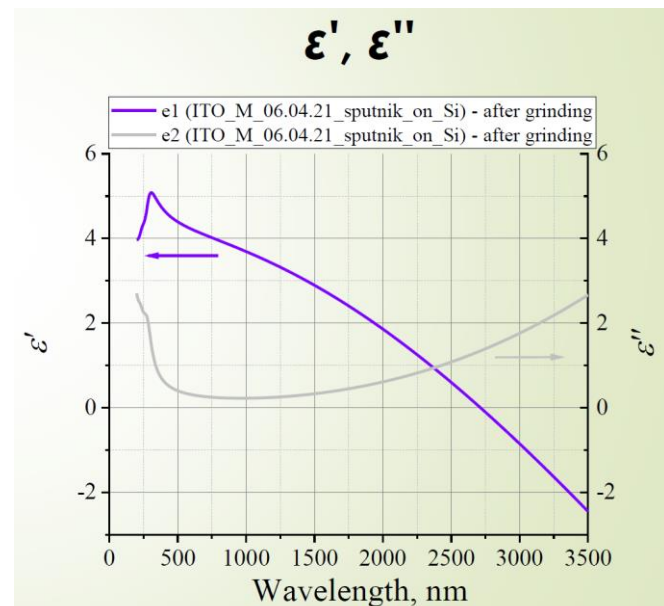
Образцы разработанных и изготовленных структур на Кремнии-На-Изоляторе (КНИ)



Компоненты системы модулятор-ввод\вывод-волновод



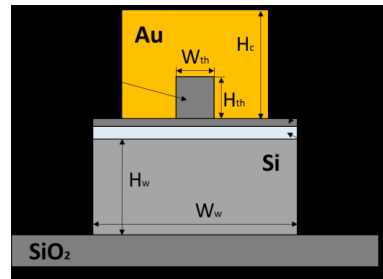
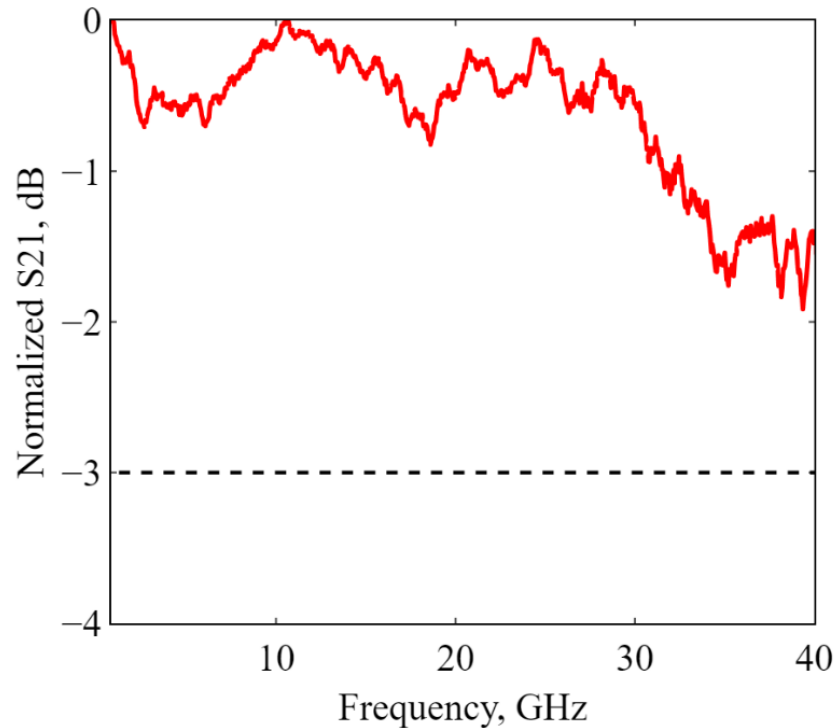
Активный слой ITO



Спектроскопический эллипсометр
SENresearch 4.0. Sentech Instruments

**Модуляторы на основе электро-поглощения
вследствие дисперсии свободных
носителей (плазмоны)**

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



Принцип действия

Напряжение отсутствует



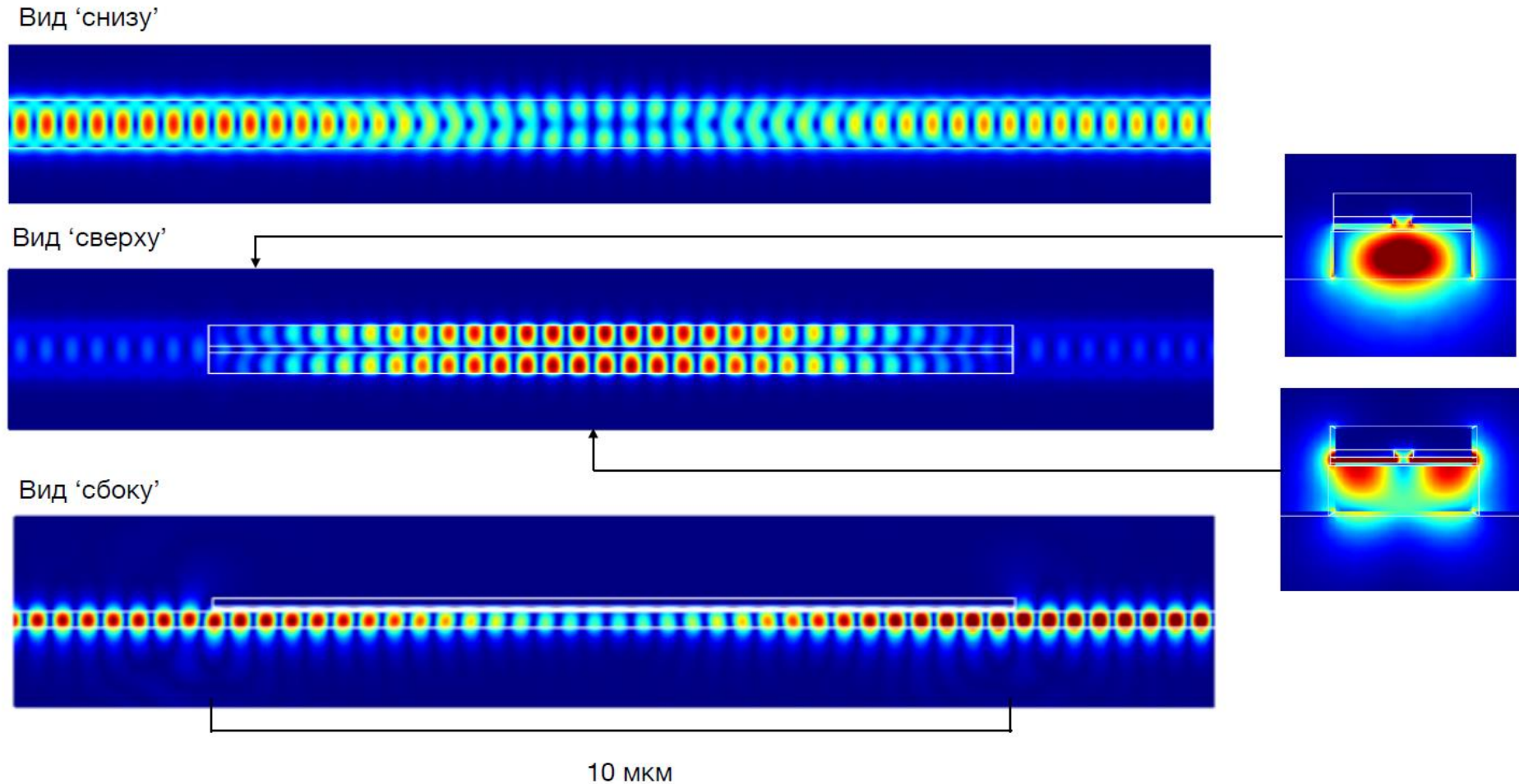
Напряжение приложено



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

Распространение гибридной моды. Модулятор в состоянии вкл.

$T=0.70113$ (опт. потери 1.54 дБ)

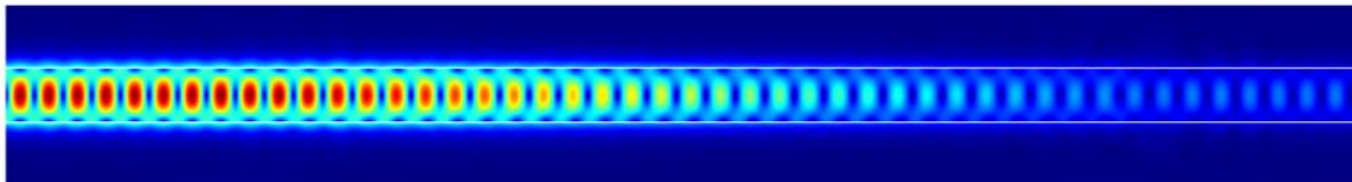


I.A. Pshenichnyuk, G.I. Nazarikov, S.S. Kosolobov, A.I. Maimistov, V.P. Drachev.
Edge-plasmon assisted electro-optical modulator.
Phys. Rev. B 100 (19), (2019).
Получен патент РФ.

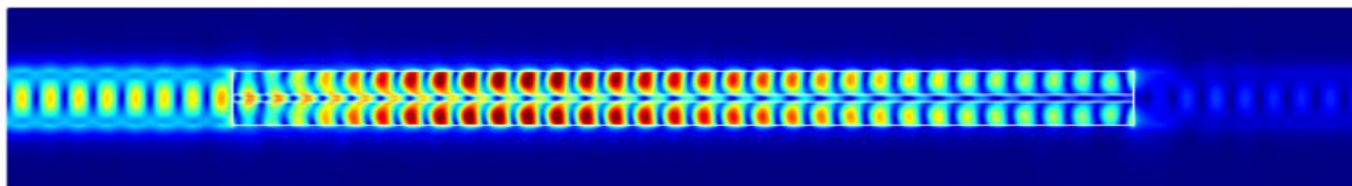
Модулятор в состоянии выкл.

$T=0.063421$ (экстинкция 10.44 дБ)

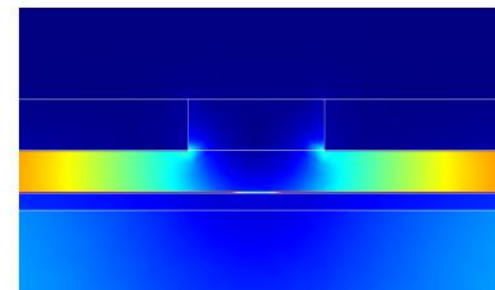
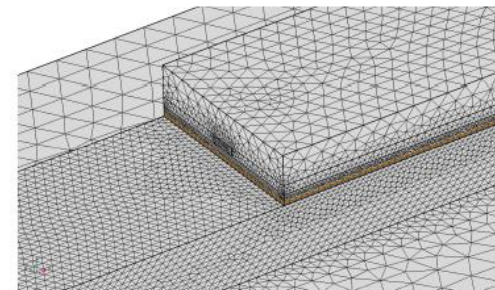
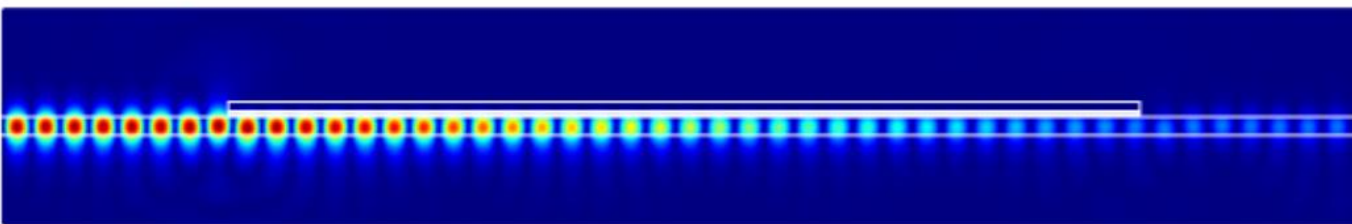
Вид 'снизу'



Вид 'сверху'



Вид 'сбоку'

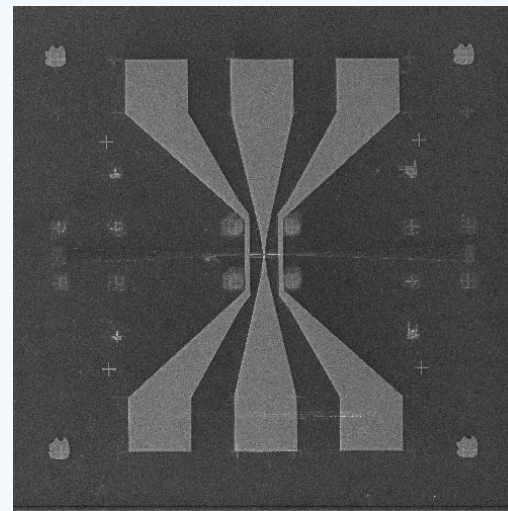
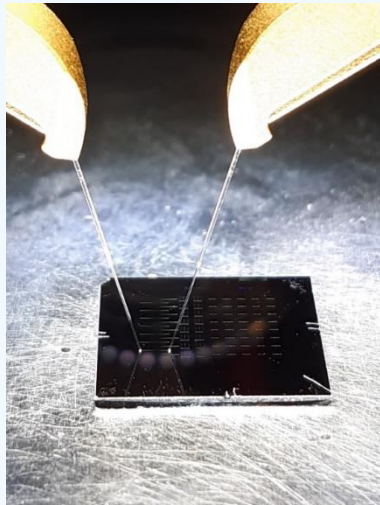


I.A. Pshenichnyuk, G.I. Nazarikov, S.S. Kosolobov, A.I. Maimistov, V.P. Drachev.
Edge-plasmon assisted electro-optical modulator.
Phys. Rev. B 100 (19), (2019).

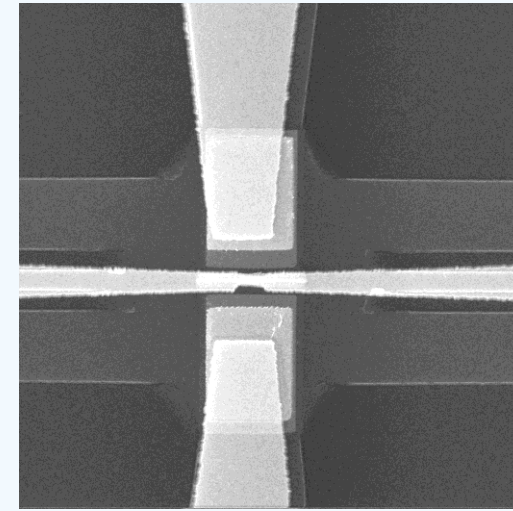
Получен патент РФ.

Электро-оптический модулятор на гибридном волноводе Si-ITO-SiO₂-Au
(модуляция оптического сигнала на радио частоте в полосе 40 ГГц по уровню 2 дБ):

Интегральные опто-электронные компоненты для радиофотоники
и нового поколения волоконной и беспроводной связи.



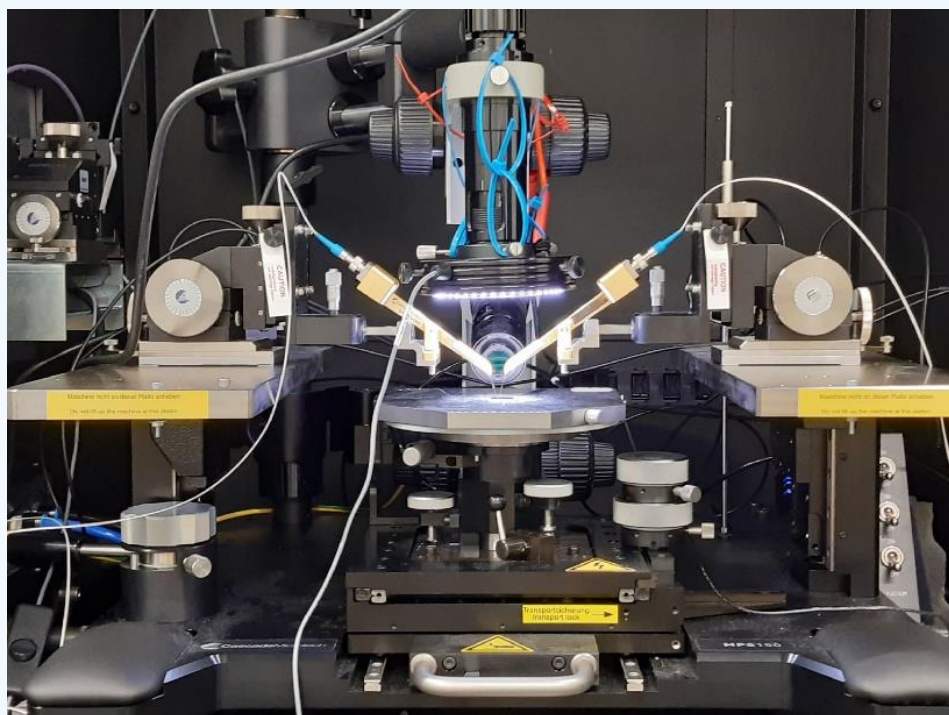
Структура полностью
600x600 мкм



Активная область модулятора
Изображение 6x6 мкм

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 2021125699/28(054303).

Модулятор на гибридном волноводе на КНИ



Фотонные Интегральные Схемы:
полный цикл в одной лаборатории
Расчеты-Разработка технологии-
Изготовление-**Тестирование**-Передача
технологии промышленности

Зондовая станция с оптическими зондами и СВЧ зондом

Активные компоненты:

Интегральные опто-электронные компоненты для радиофотоники и нового поколения беспроводной связи.

S21 полоса частот 41ГГц+

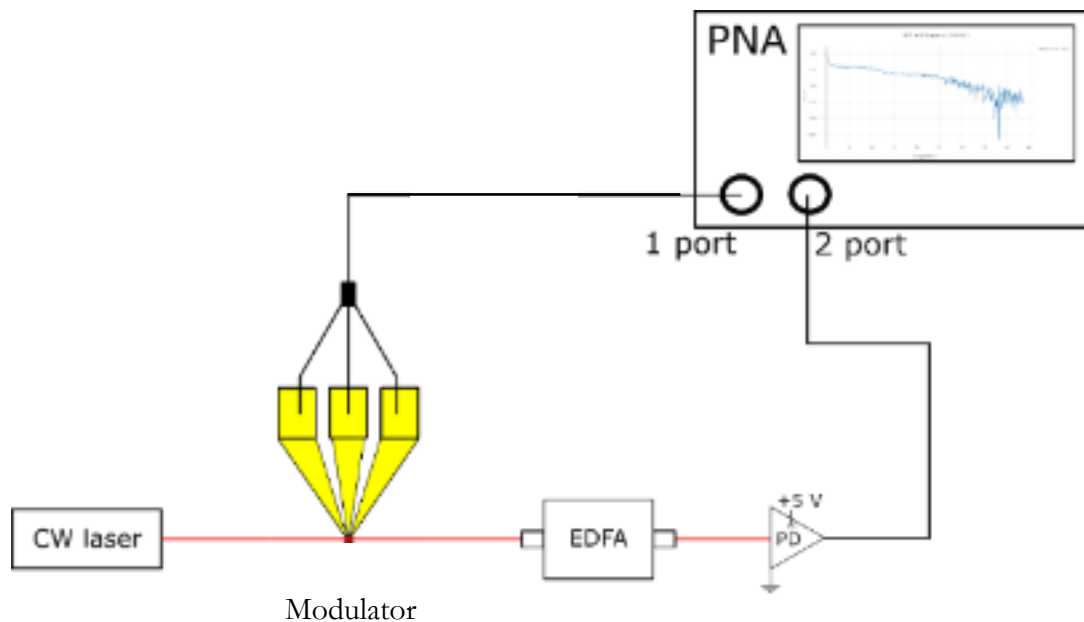
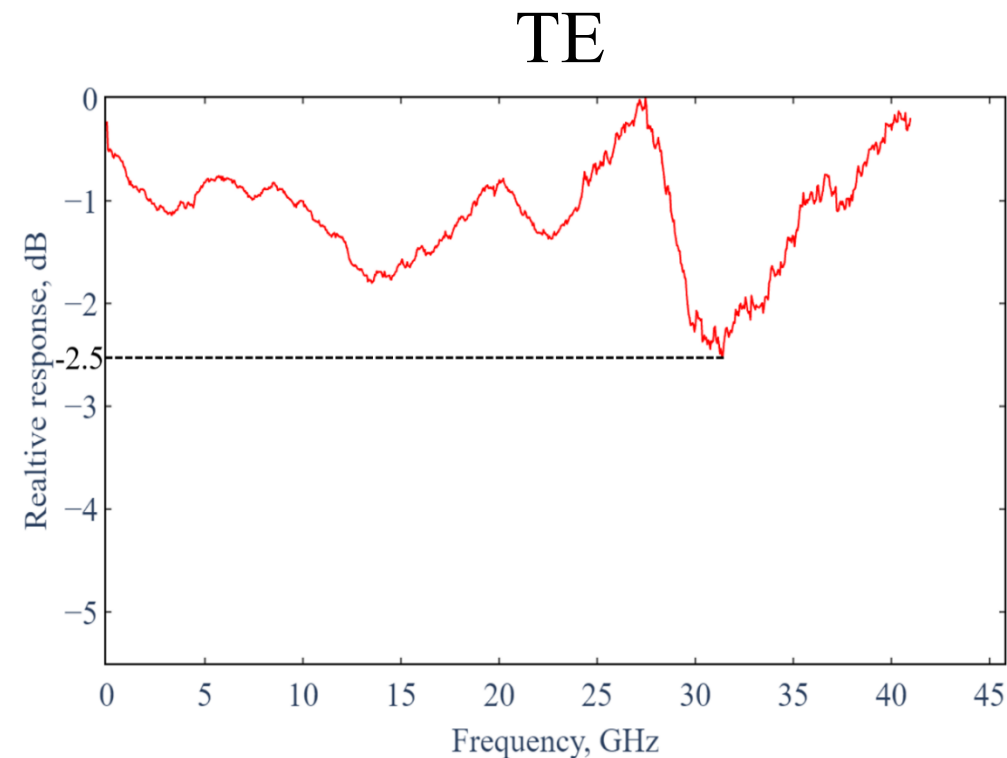


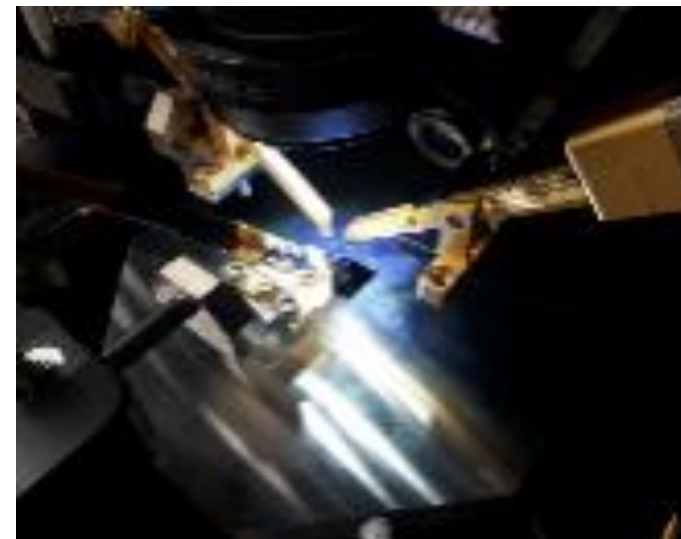
Схема измерений экспериментального образца электрооптического плазмонного модулятора. CW laser- непрерывный лазер, PNA- векторный анализатор, EDFA- оптоволоконный эрбиевый усилитель.



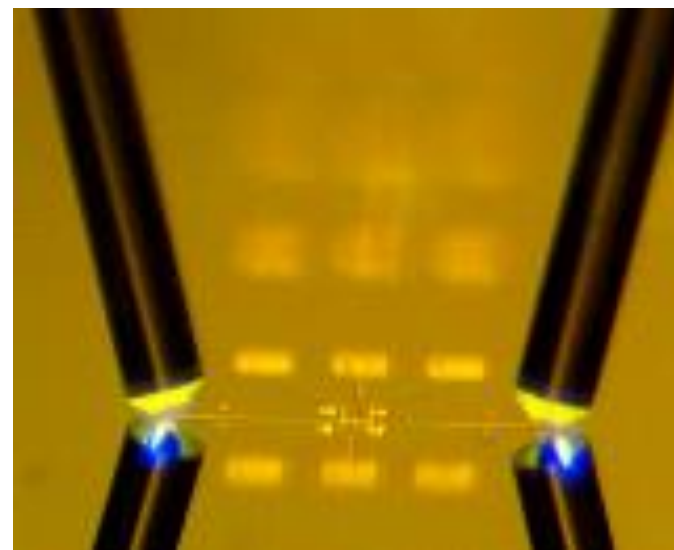
Относительный отклик S21 электрооптического модулятора.

Optical Spectra (BOSA)

Анализатор спектра на основе Вынужденного Рассеяния Мандельштама-Бриллюэна

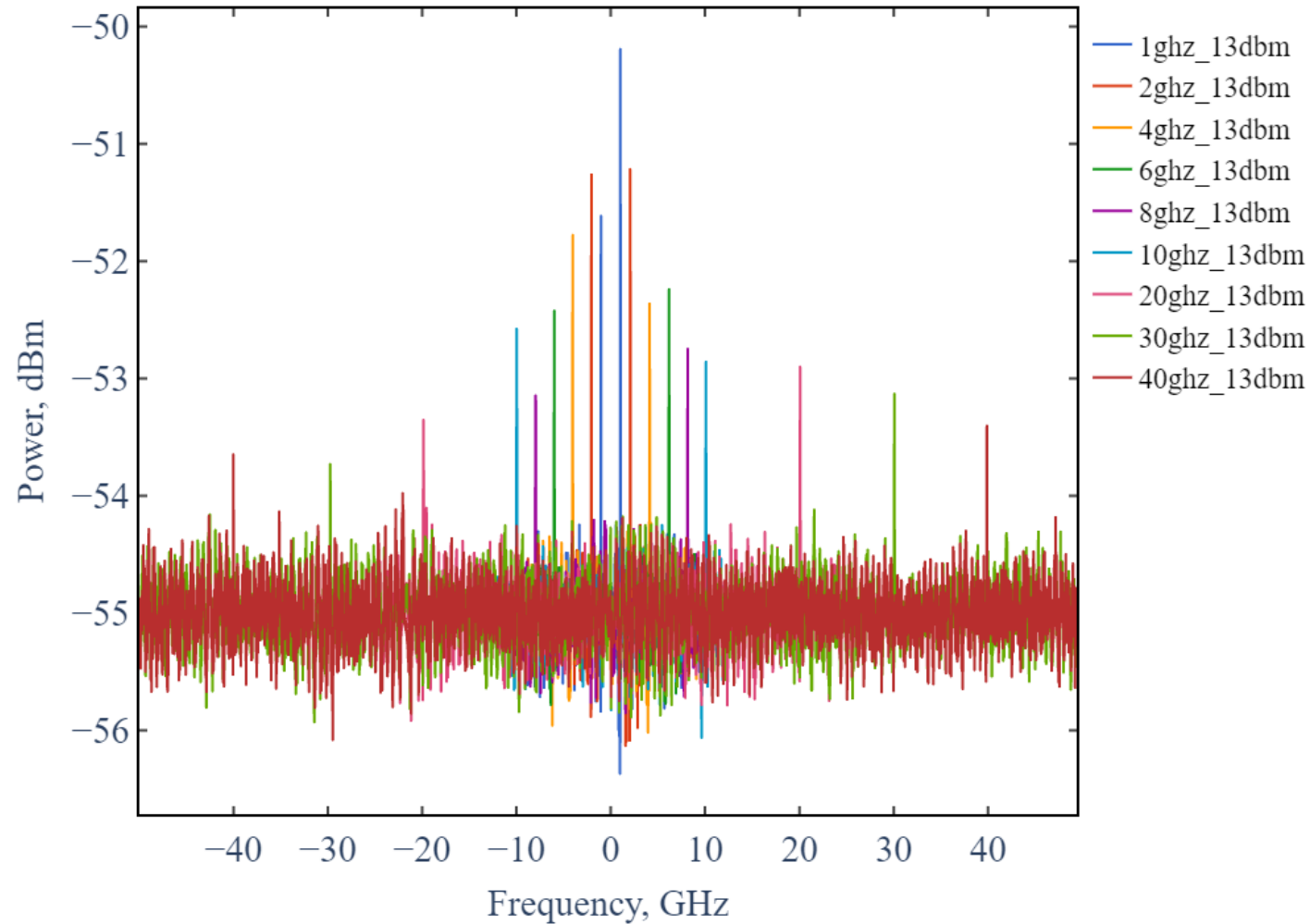


- **Спектральное разрешение:** 0.5 пм
- **Спектральный диапазон:** 1520 – 1630 нм
- **Динамический диапазон:** 80 дБ

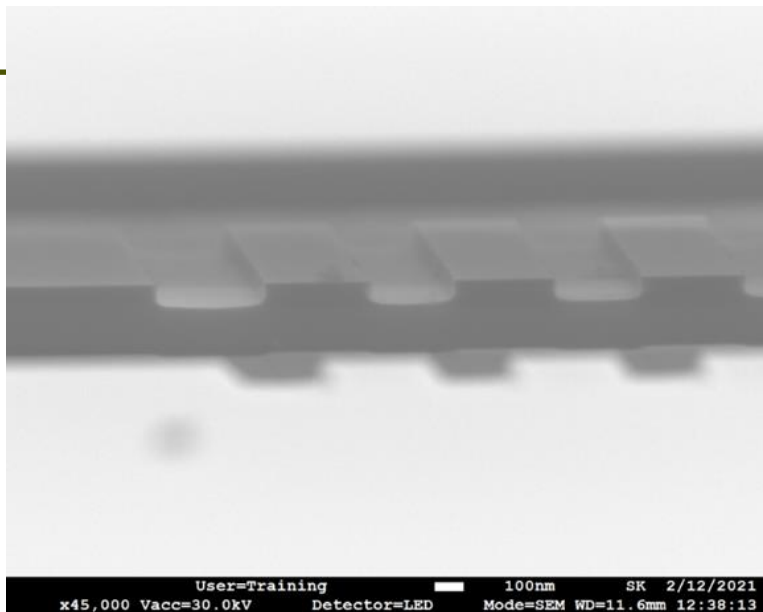


Оптический анализатор спектра

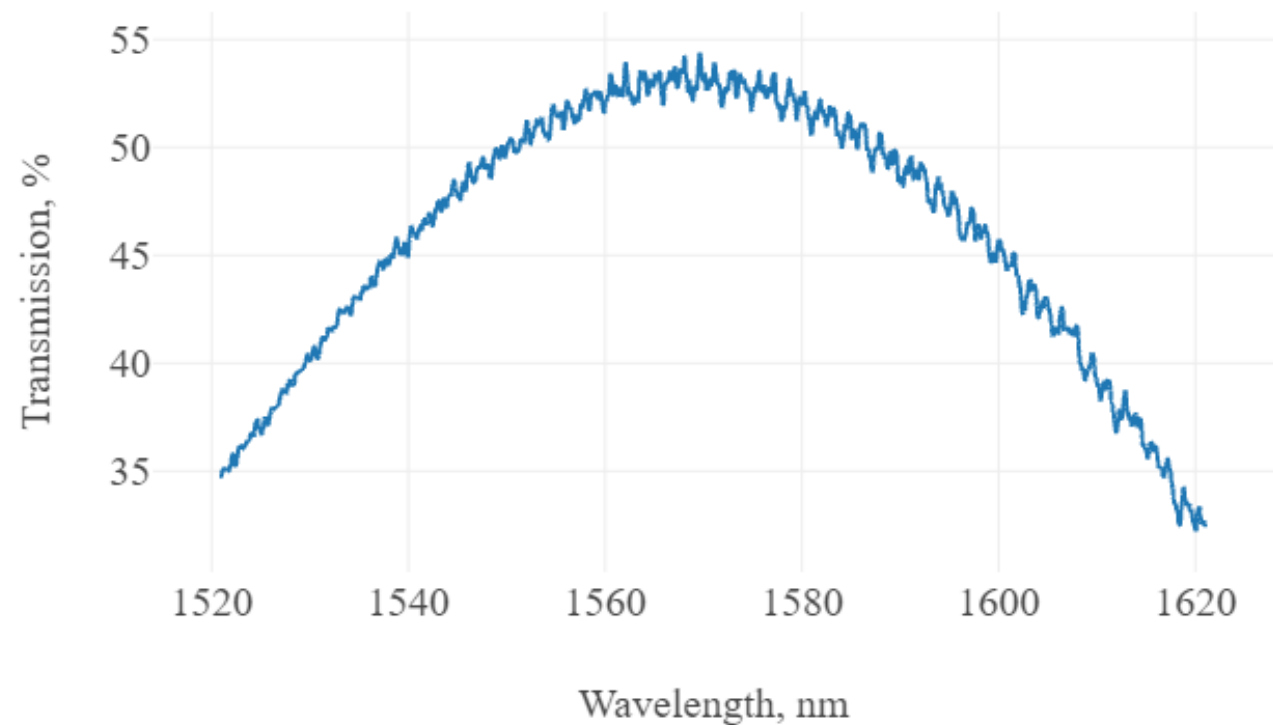
Модулятор полоса частот 41ГГц+



Дифракционные решетки: ввод и вывод излучения



SEM фотография
Период 640



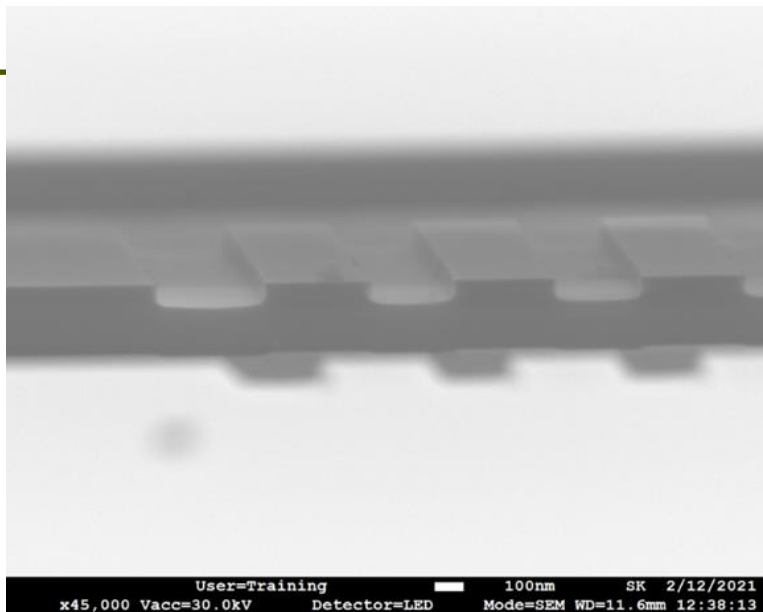
Спектр пропускания одной решетки

Broadband silicon grating couplers with high efficiency and robust design

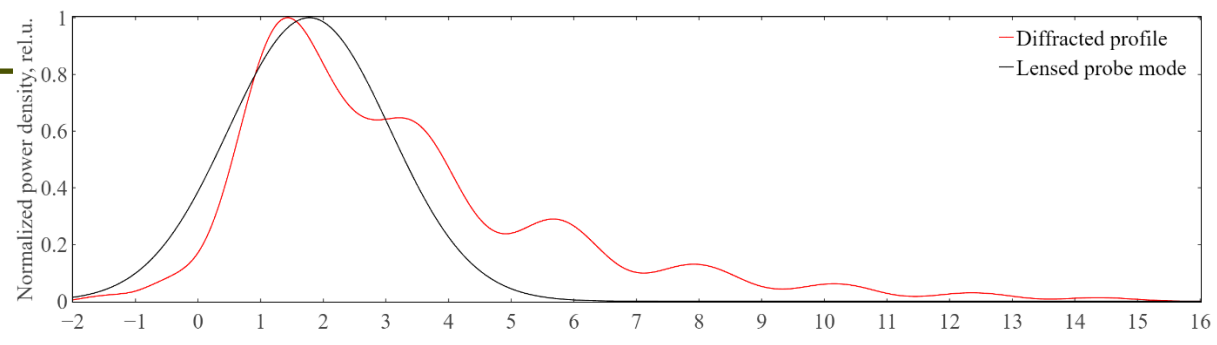
DANIIL S. ZEMTSOV^{*1}, DENIS M. ZHIGUNOV¹, SERGEY S. KOSOLOBOV¹, ANASTASIA K. ZEMTSOVA¹, MARIUS PUPLAUSKIS¹, IVAN A. PSHENICHNYUK¹, AND VLADIMIR P. DRACHEV¹

Optics Letters 47, No. 13 / 1 July 2022

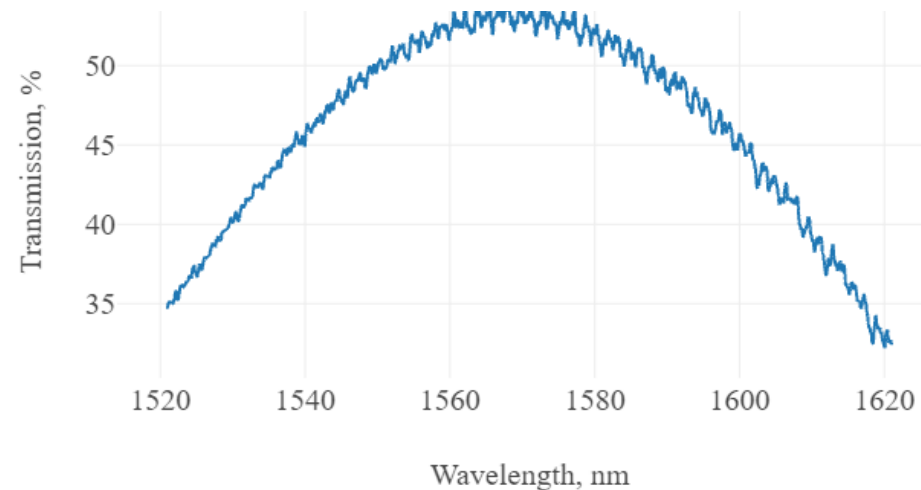
Дифракционные решетки: ввод и вывод излучения



SEM фотография
Период 640



Согласование моды линзованного волокна и дифракционной решетки



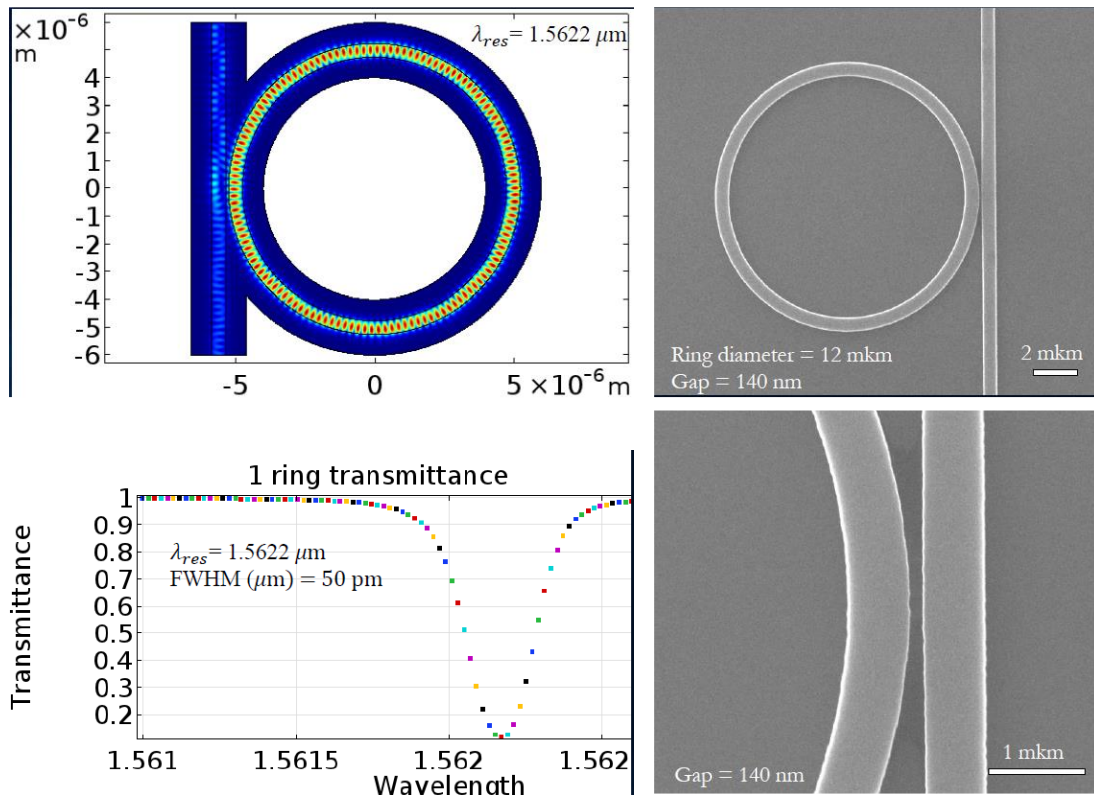
Спектр пропускания одной решетки

Broadband silicon grating couplers with high efficiency and robust design

DANIIL S. ZEMTSOV^{*1}, DENIS M. ZHIGUNOV¹, SERGEY S. KOSOLOBOV¹, ANASTASIA K. ZEMTSOVA¹, MARIUS PUPLAUSKIS¹, IVAN A. PSHENICHNYUK¹, AND VLADIMIR P. DRACHEV¹

Optics Letters 47, No. 13 / 1 July 2022

Создание технологии производства Компактных Анализаторов Сигналов Волоконно-Оптических Датчиков (КАСВОД)



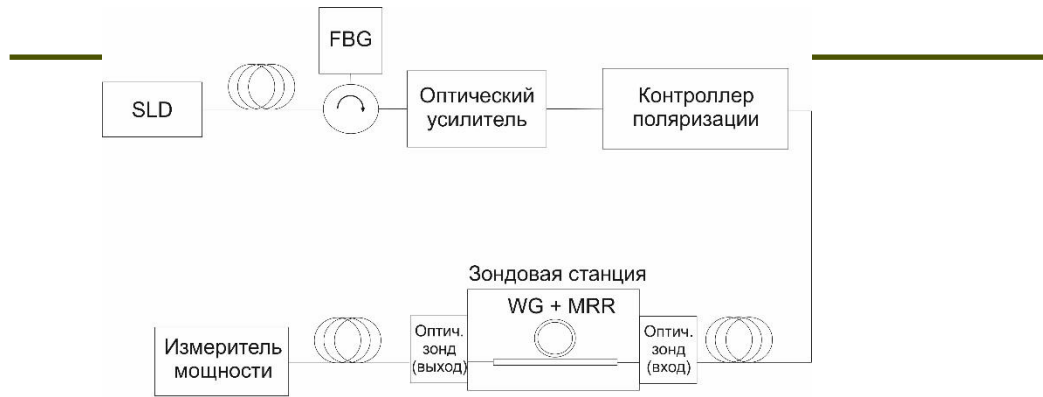
Микрокольцевые резонаторы

Создание технологии производства компактных анализаторов сигналов волоконно-оптических датчиков деформаций на основе фотонных интегральных схем и волоконной оптики.

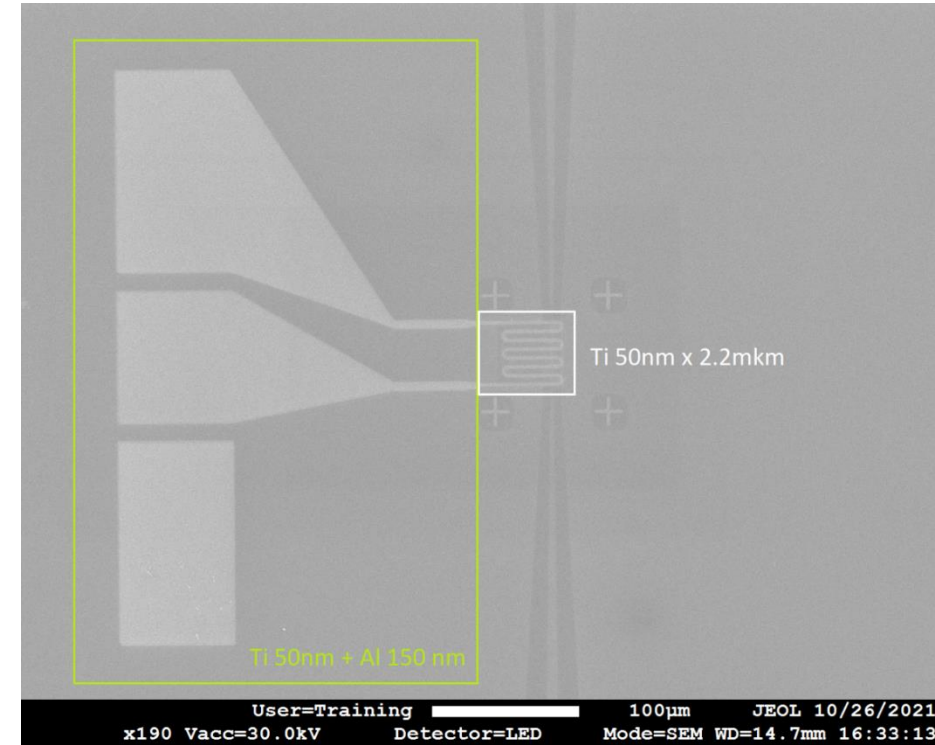
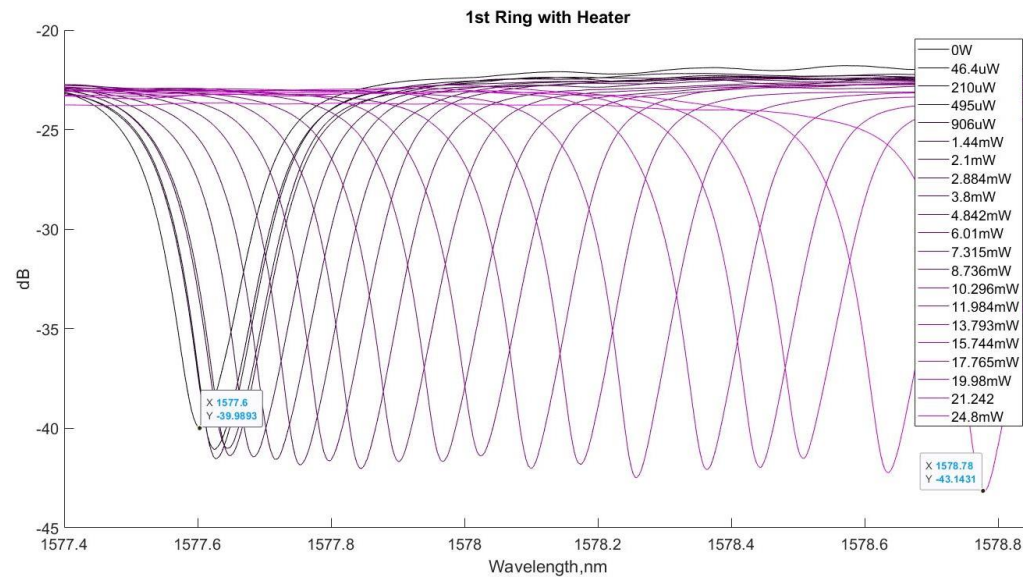
Сколтех – ИАиЭ - ПНППК

Перестройка температурой

Микрокольцевые резонаторы



SLD: суперлюминесцентный диод
FBG: волоконная Брэгговская решетка
WG + MRR: волновод + микрорезонаторное кольцо



46.9 пм/мВт

О чем шла речь:

1. Кремнивая технология применима для реализации гибридных плазмон- поляритонных ТГц фотонных интегральных схем включая модуляторы и фотоприемники.
2. Наши компетенции охватывают все компоненты необходимые для реализации проектов.
3. Фотонные Интегральные Схемы:
Расчеты-Разработка технологии-
Изготовление-Тестирование-Передача технологии промышленности
4. Разработаны ключевые компоненты, переход к устройствам и системам