

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе**

Российской академии наук

## **Ниобат лития как платформа для создания интегрально-оптических устройств радиофотоники**

П.М. Агрузов, И.В. Ильичев, А.А. Усикова,  
А.В. Тронеv, А.В. Варламов, М.В. Парфенов,  
**А.В. Шамрай**

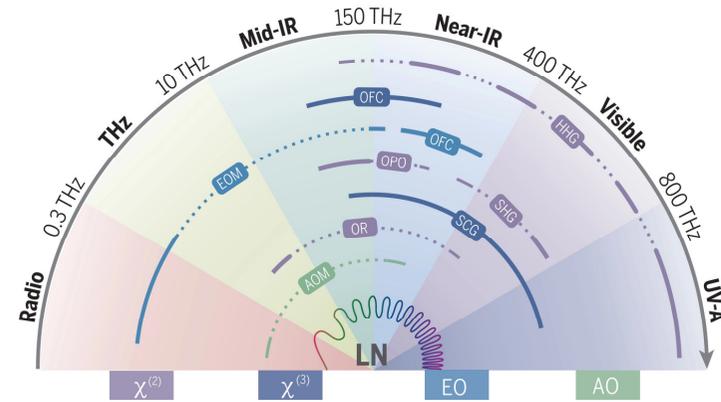
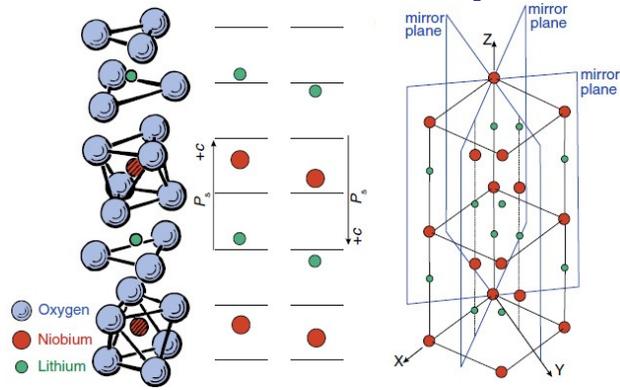
[achamrai@mail.ioffe.ru](mailto:achamrai@mail.ioffe.ru)

(812) 297-70-55

## План доклада

- Введение (исторический экскурс)
- Сверхширокополосные модуляторы для радиофотоники
- Интегрально-оптические устройства, разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и их применение в радиофотонике
- Модуляторы на основе тонкопленочного ниобата лития
- Заключение

# Ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ )



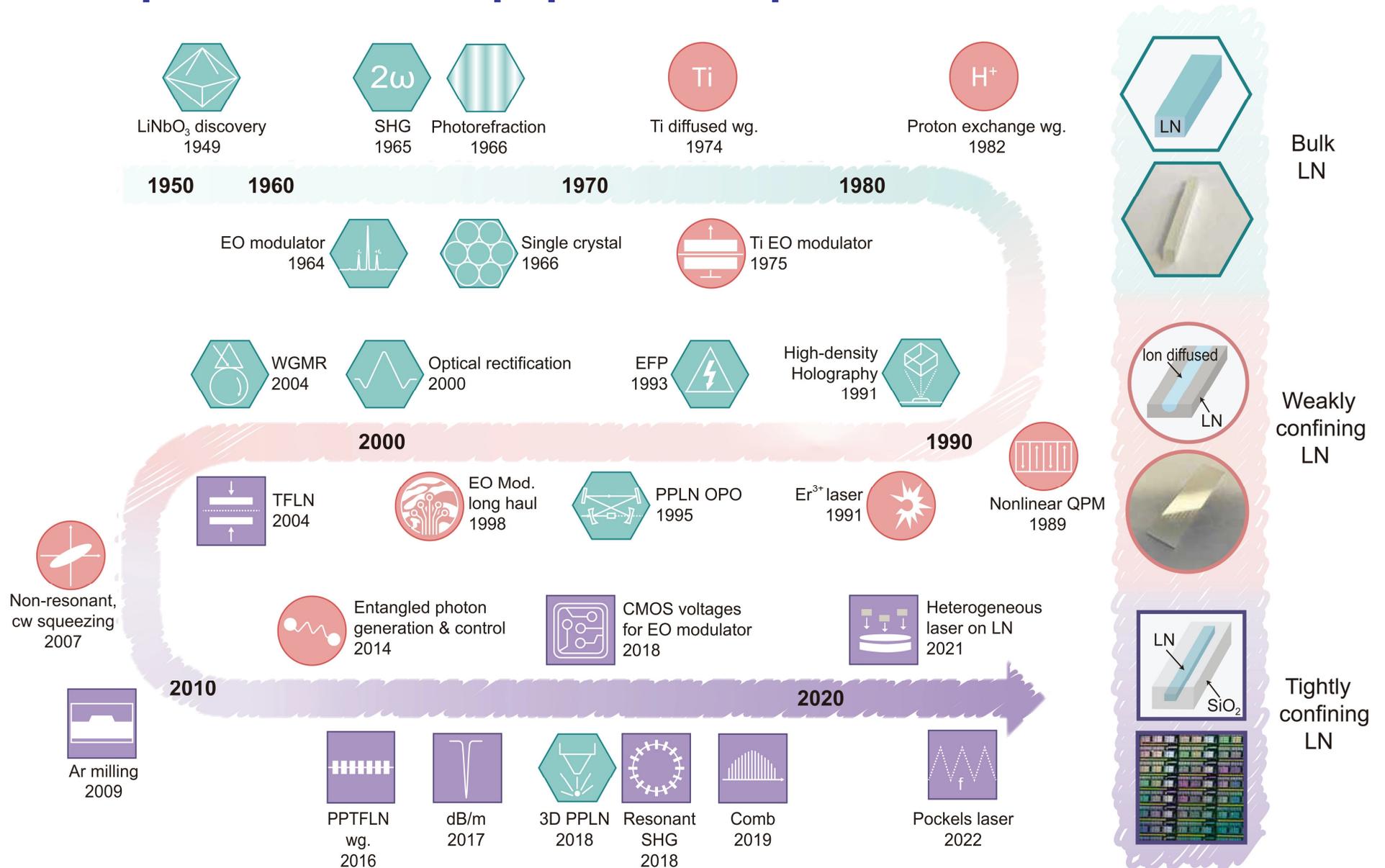
|                 | A Optical nonlinearities $\chi^{(2)}$     |  |   | B $\chi^{(3)}$  |   |
|-----------------|---|--|---|---|---|
| <b>Process</b>  | SHG<br>second-harmonic generation         | SFG<br>sum-frequency generation                          | DFG<br>difference-frequency generation        | FWM<br>non-degenerate four wave mixing                    | FWM<br>degenerate four wave mixing        |
| <b>Example</b>  | frequency-doubled solid-state laser       | sodium-yellow guide star                                 | optical parametric oscillator                 | optical parametric amplifier                              | Kerr resonator                            |
| <b>Spectrum</b> | Frequency: $\omega$ to $2\omega$ (octave) | Frequency: $\omega_1, \omega_2$ to $\omega_1 + \omega_2$ | Frequency: $\omega_1, \omega_s$ to $\omega_p$ | Frequency: $\omega_1, \omega_{p1}, \omega_{p2}, \omega_s$ | Frequency: $\omega_1, \omega_p, \omega_s$ |

Boes et al., Science 379, 40 (2023)

DOI: 10.1126/science.abj4396

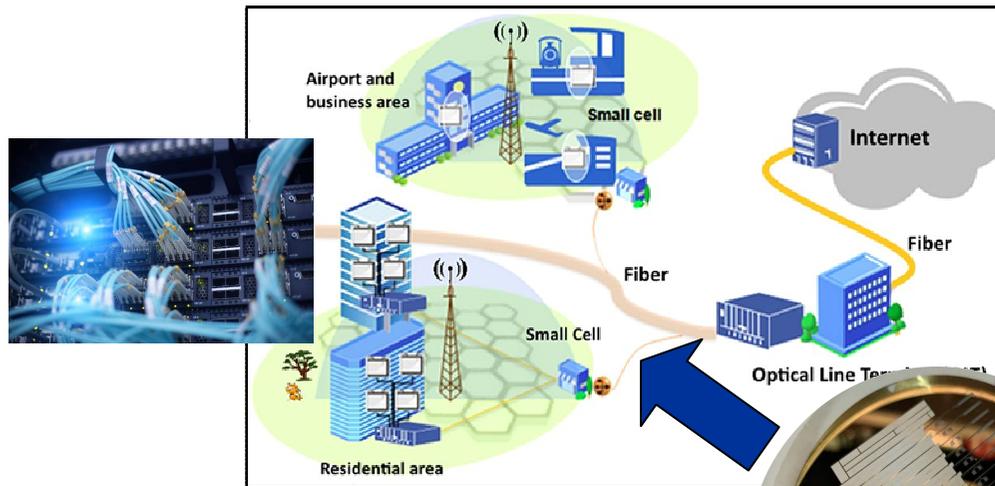
| C Electro-optic effect |  |                         | D Photo-elastic & Piezo-electric effect  |   |  |
|------------------------|--|-------------------------|--|---|--|
| <b>Process</b>         | index change due to electric field           | single / dual sidebands | photo-elastic index change due to strain | piezo-electric electric field due to strain | Acousto-optic modulator                                    |
| <b>Example</b>         | polarization, phase and amplitude modulation | GHZ                     | LN                                       | LN  | amplitude modulation, beam deflection & frequency shifting |
| <b>Spectrum</b>        | wideband EO-combs                            | single sideband         |  |   |  |

# Ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) – материальная платформа интегральной оптики

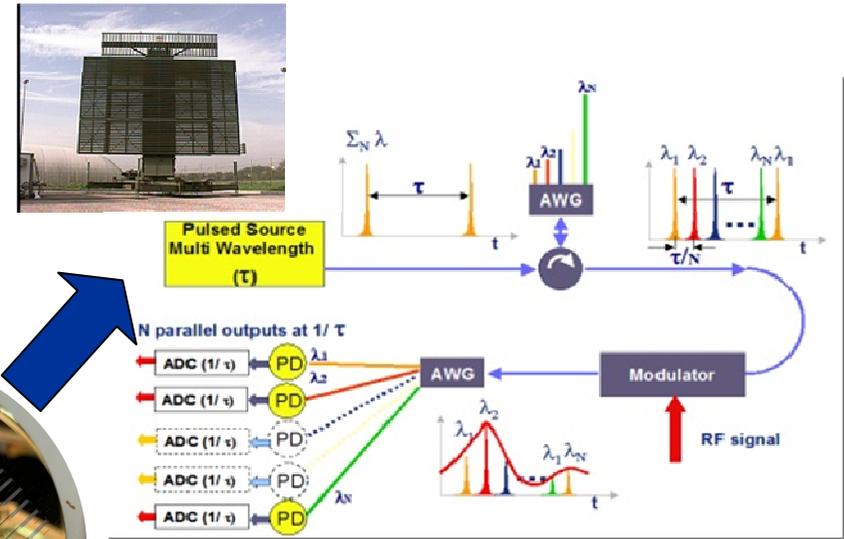


# Области применения интегральной оптики на $\text{LiNbO}_3$

## Телекоммуникации

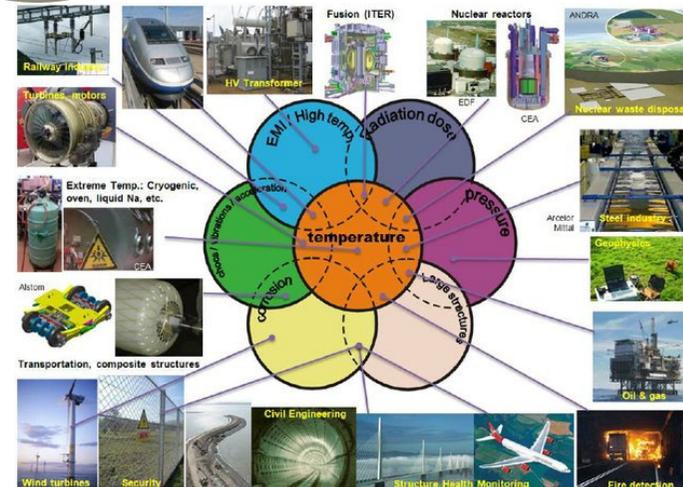
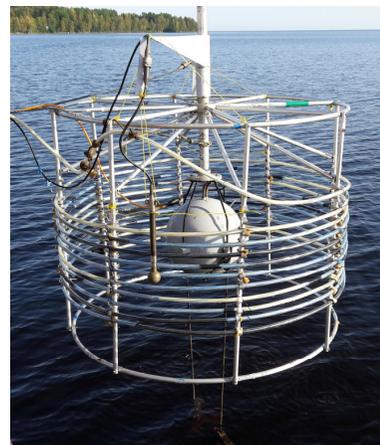


## Радиофотоника



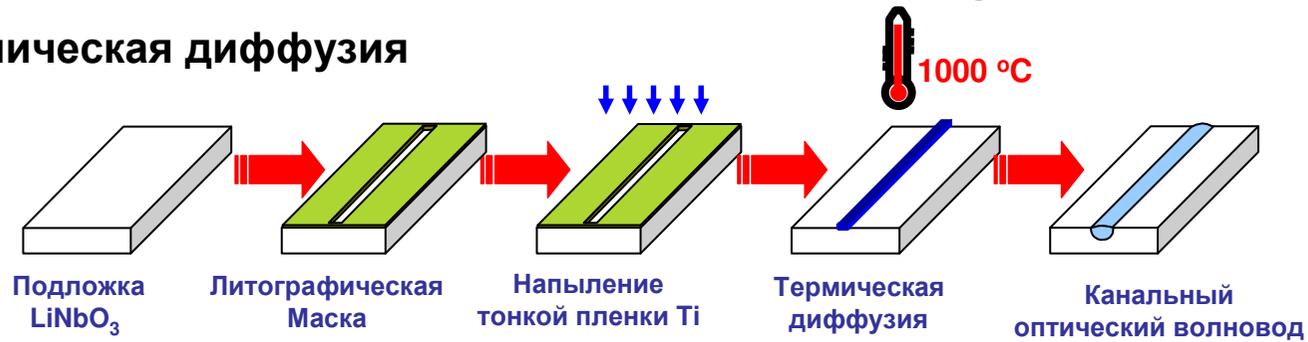
- Низкий уровень вносимых шумов
- Работа с высокой оптической мощностью

## Волоконно-оптические датчики

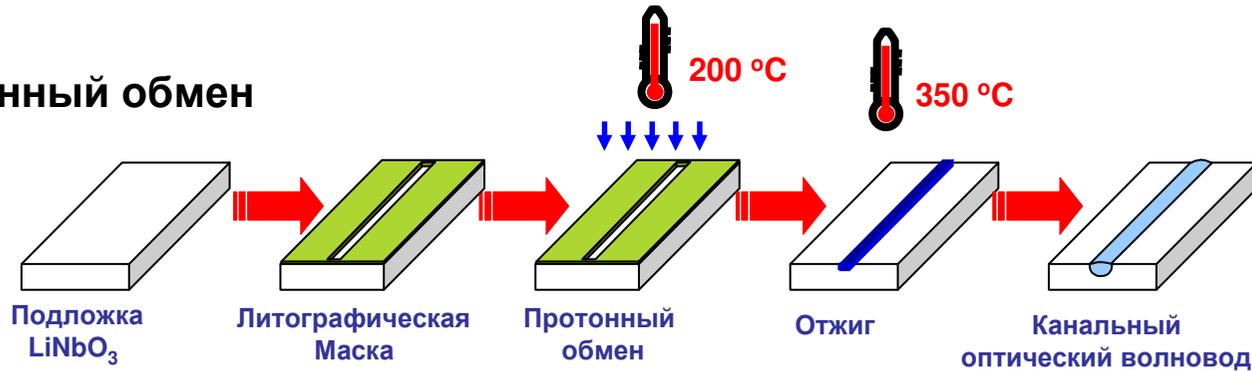


# Технология оптических волноводов на кристаллических подложках $\text{LiNbO}_3$

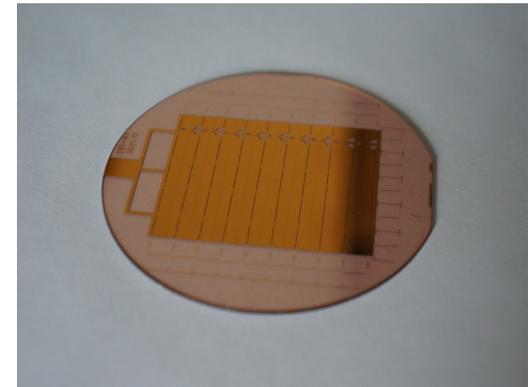
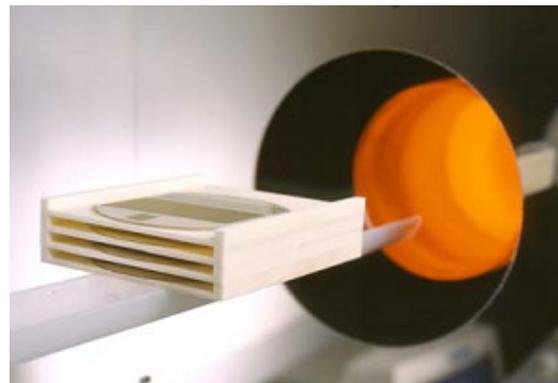
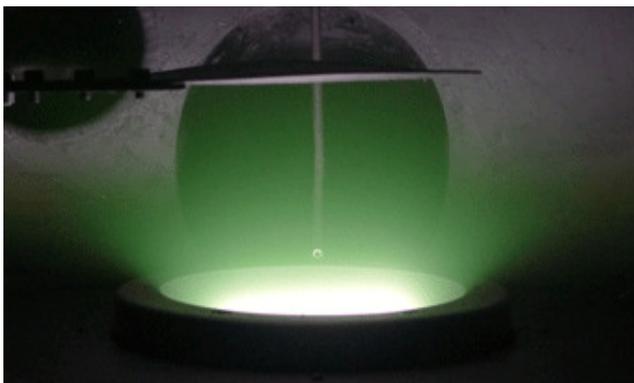
- Термическая диффузия



- Протонный обмен



## Пластины конгруэнтного ниобата лития



# Технология интегральных схем на ниобате лития в ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Вэйфер  
7,62 мм



Фотолитография



Магнетронное  
напыление



Высокотемпературный  
отжиг



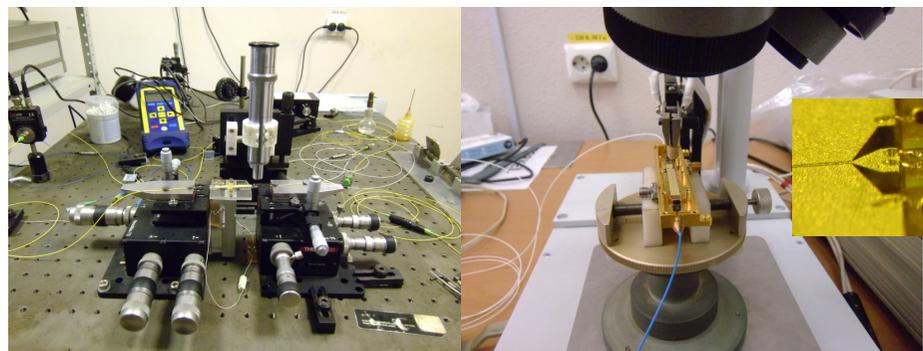
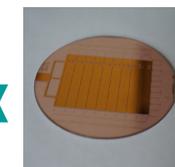
Тестирование чипов



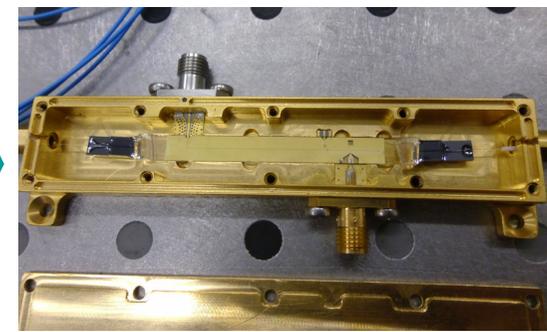
Полировка



Алмазная резка  
(разделение на чипы)



Сборка в корпус



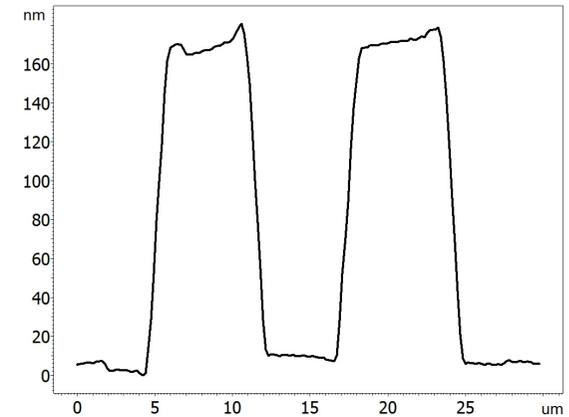
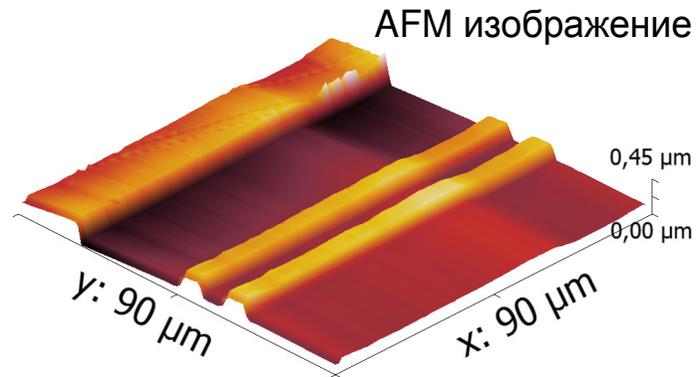
Устройство

# Параметры волноводов

Диапазон рабочих длин волн 1500 – 1600 нм  
(возможна разработка волноводов на другие длины волн)

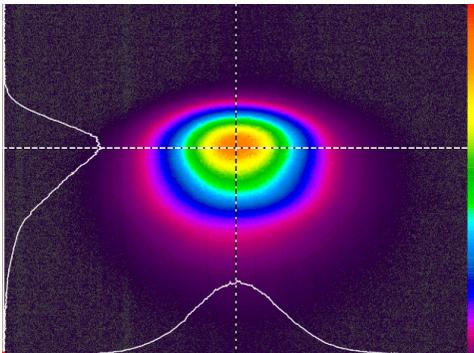
$\Delta n \sim 10^{-2} \div 10^{-4}$

**Внутренние потери  
< 0.01 дБ/мм**

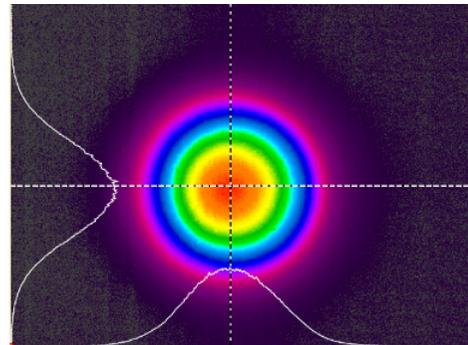


**Хорошее согласование со стандартным одномодовым волокном**

Ниобат лития X-срез



SMF-28

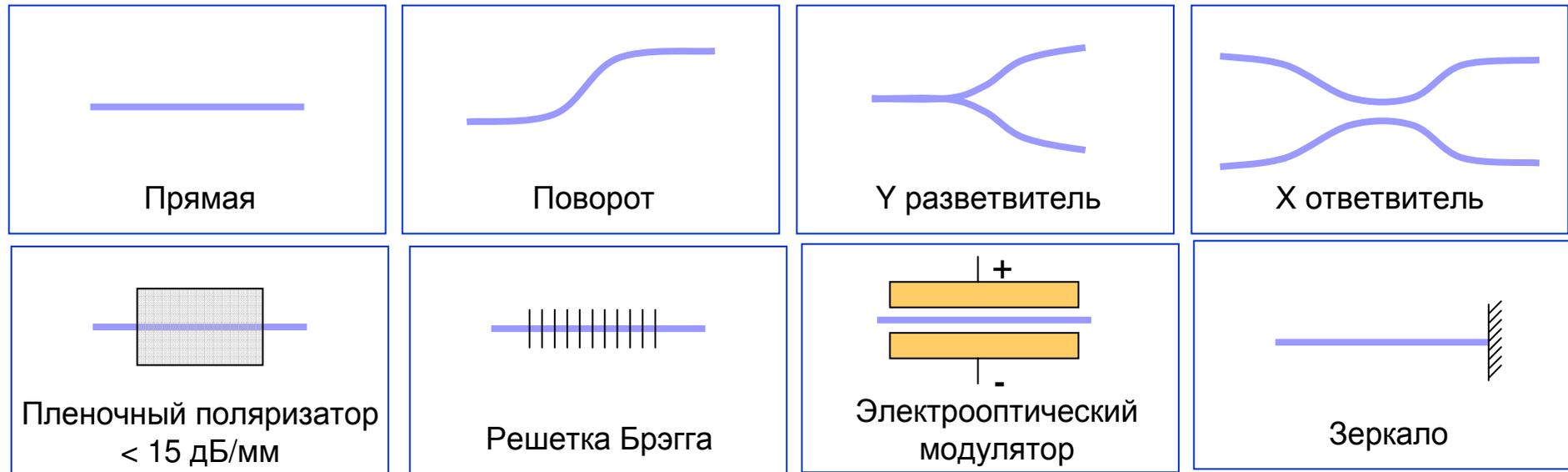


**Общие оптические потери волокно-волокно**

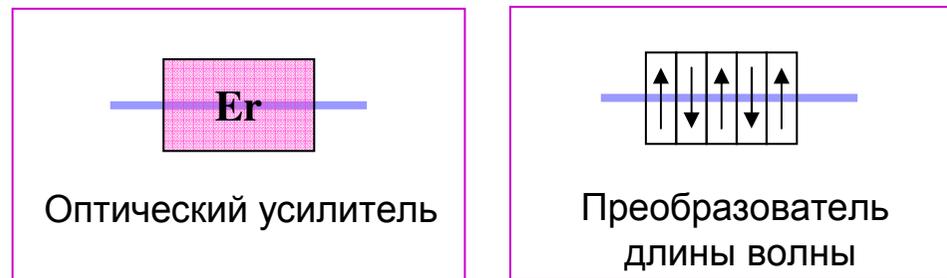
**X-срез 2.2 дБ**

**Z-срез 1.5 дБ**

# Разработаны конфигурации и отработаны технологические режимы изготовления базовых волноводных элементов интегрально-оптических схем

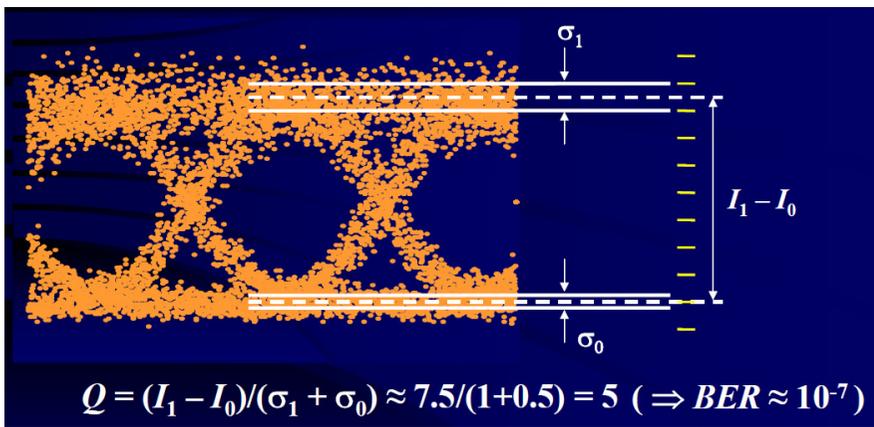
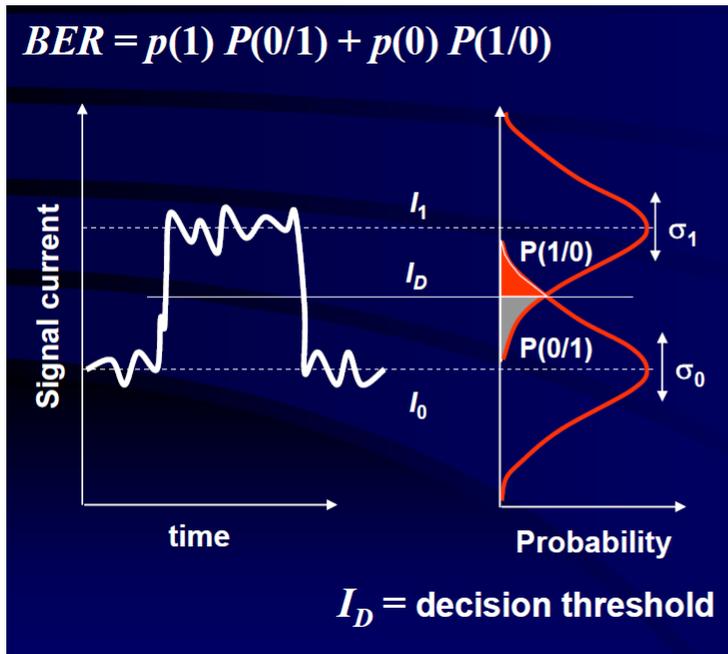


**Могут быть разработаны**

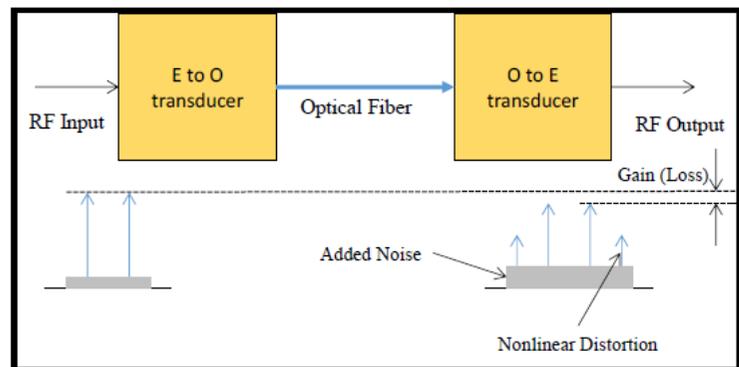


# Сверхширокополосные модуляторы для радиофотоники

Телекоммуникации  
(цифровые сигналы)

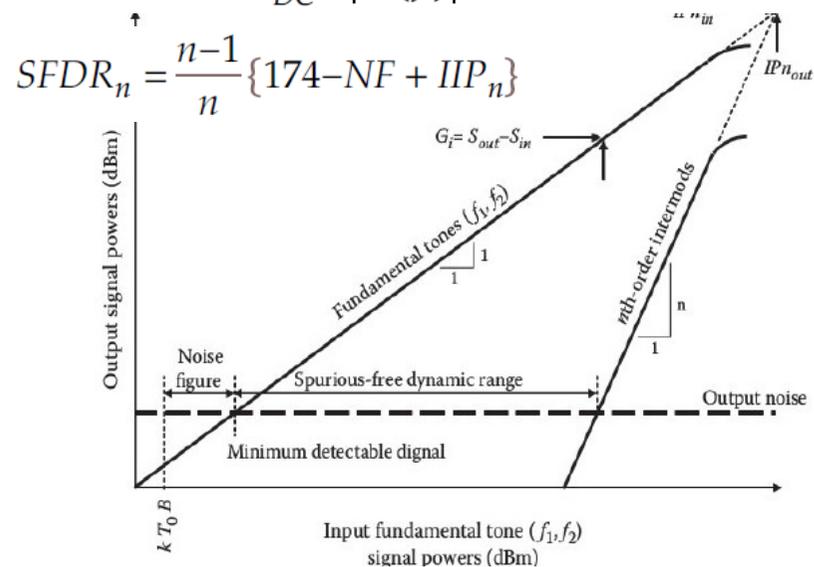


Радиофотоника  
(аналоговые сигналы)



$$g(f) = \frac{I_{DC}^2}{V_{\pi}^2} \pi^2 R^2 |H(f)|^2$$

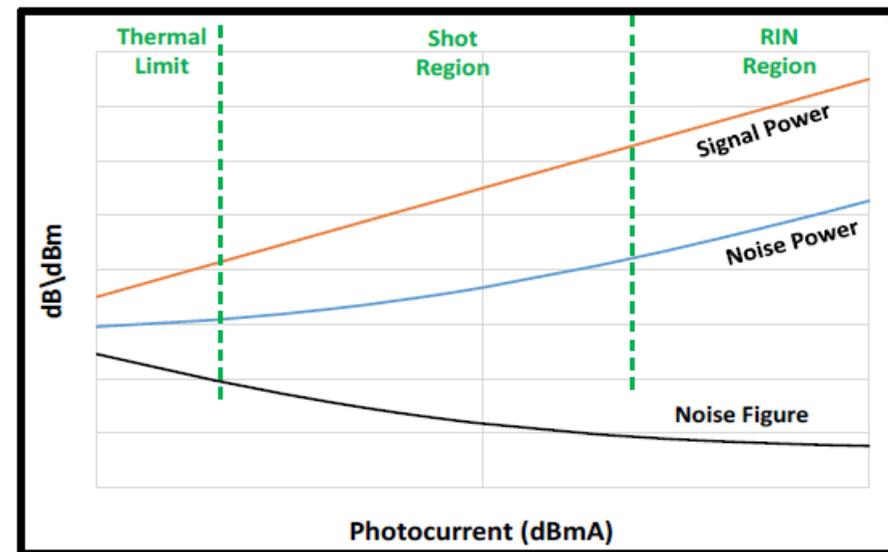
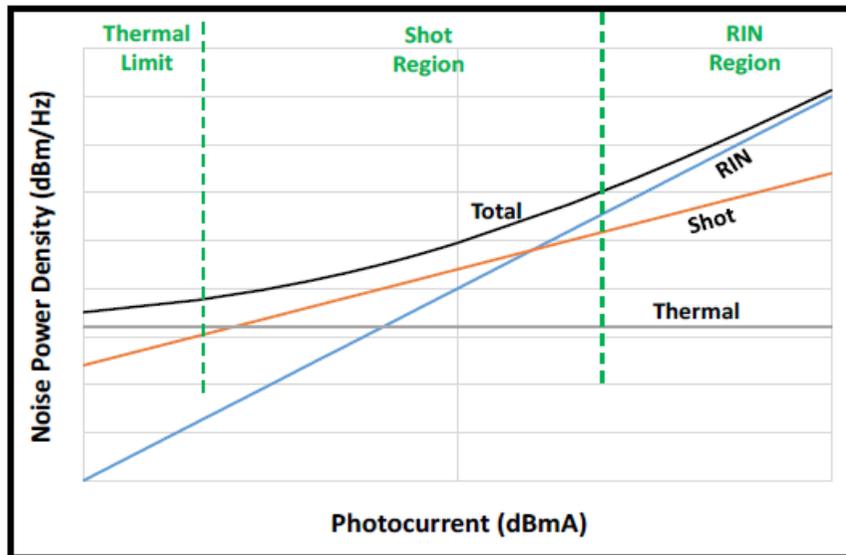
$$N_{BIX}(f) = g(f) \cdot N_{BX}(f) + k_B T + 2qI_{DC}R |H(f)|^2 + RIN \cdot I_{DC}^2 R |H(f)|^2$$



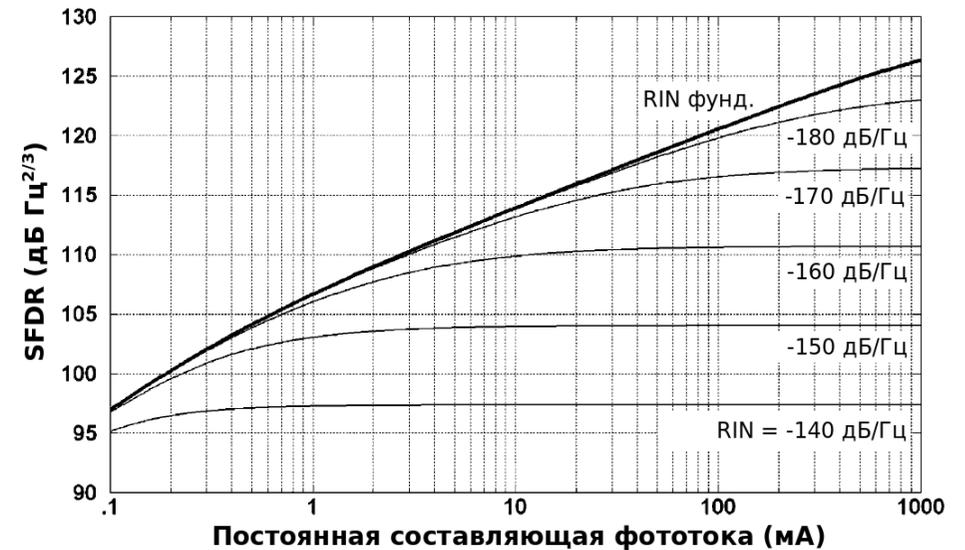
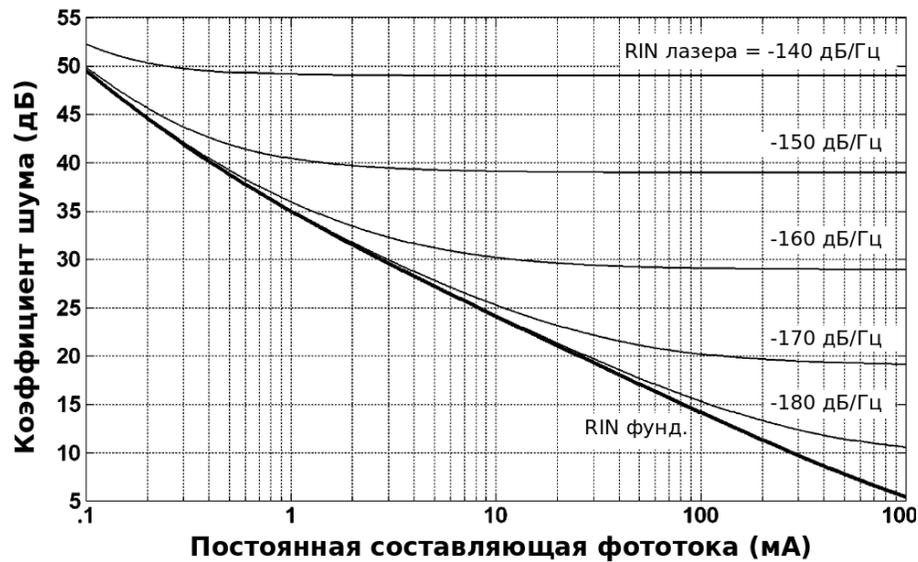
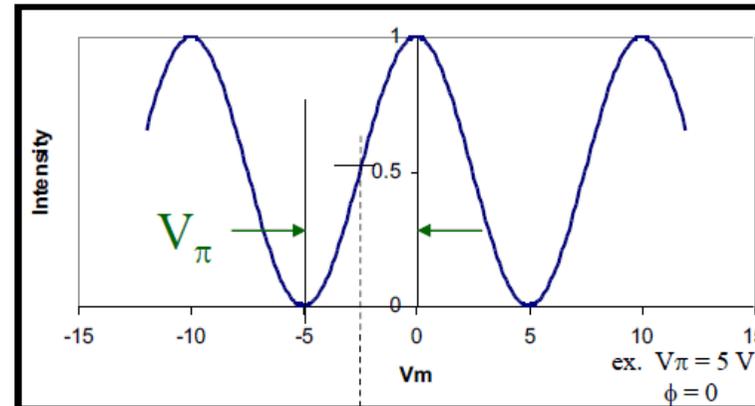
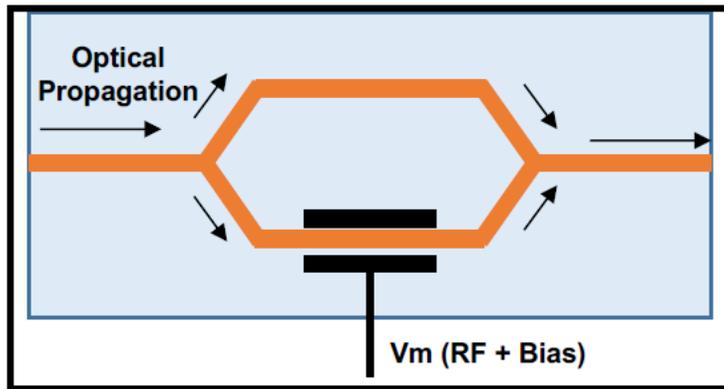
# Радиофотонная линия с внешней модуляцией и прямым детектированием



$$N_{\text{ВЫХ}}(f) = g(f) \cdot N_{\text{ВХ}}(f) + k_B T + 2qI_{\text{DC}}R |H(f)|^2 + \text{RIN} \cdot I_{\text{DC}}^2 R |H(f)|^2$$



# Модулятор Маха-Цендера



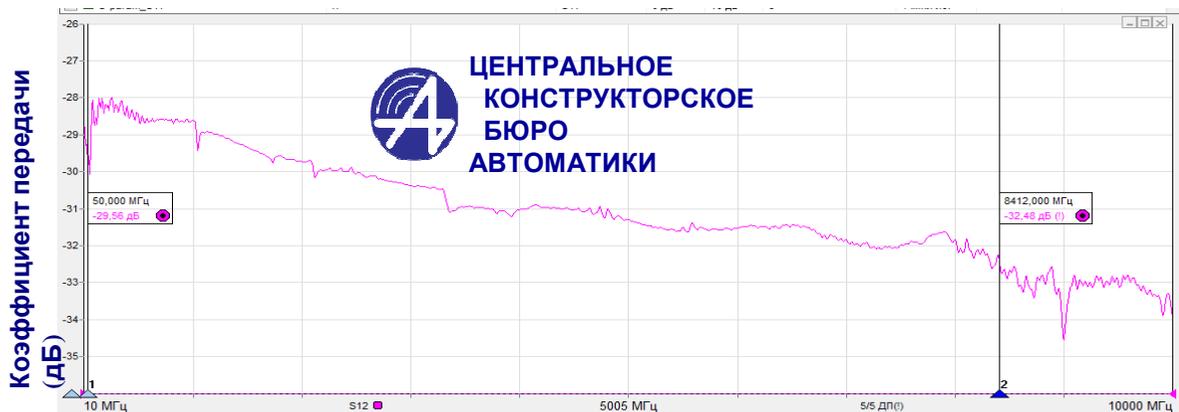
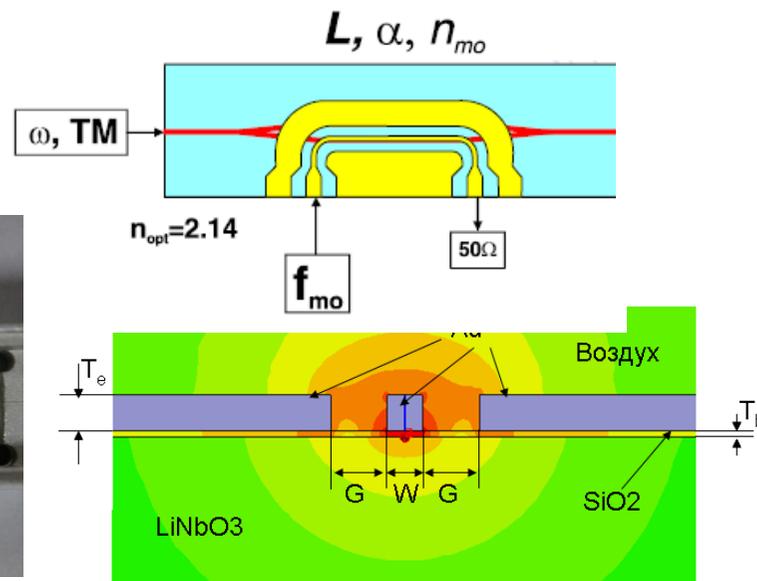
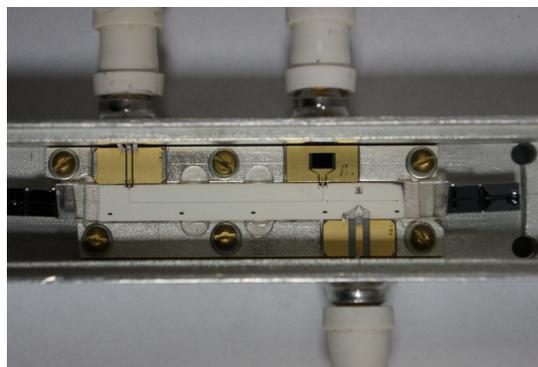
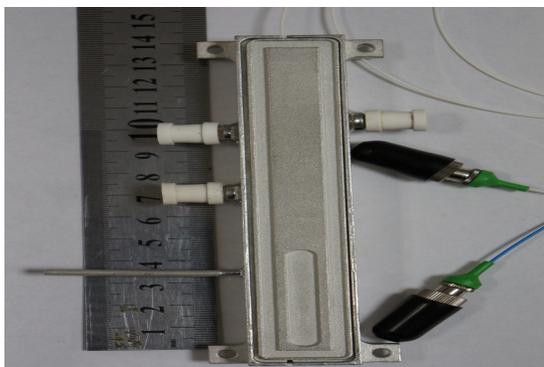
Модуляторы на основе ниобата лития позволяют использовать оптическую мощность свыше 100 мВт.

# Сверхширокополосные модуляторы для телекоммуникаций и радиофотоники

## Электроды бегущей волны:

- ✓ Согласование входного импеданса (волнового сопротивления)
- ✓ Согласование скорости распространения света и СВЧ волны
- ✓ Минимизация радиочастотных потерь
- ✓ Минимизация полуволнового напряжения

## Первый отечественный СВЧ модулятор (2011 г.)



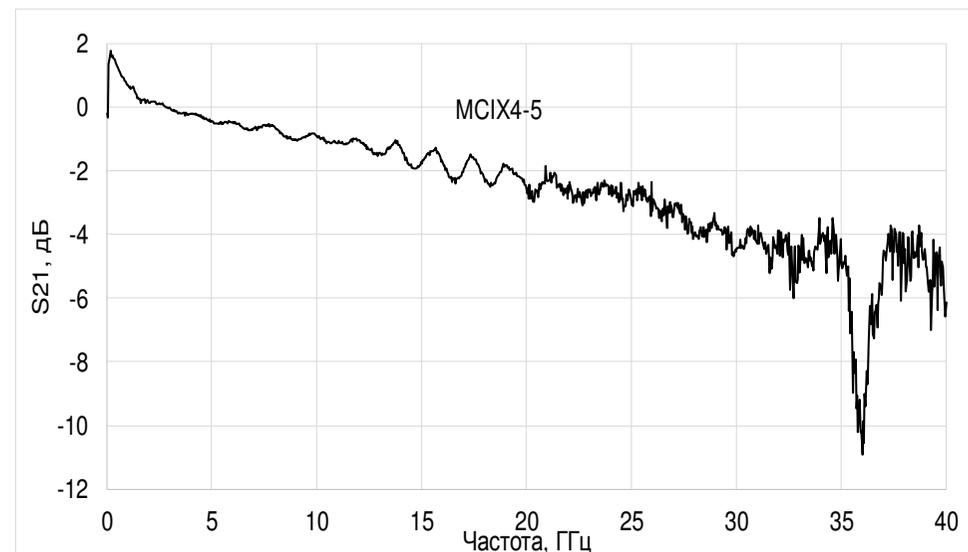
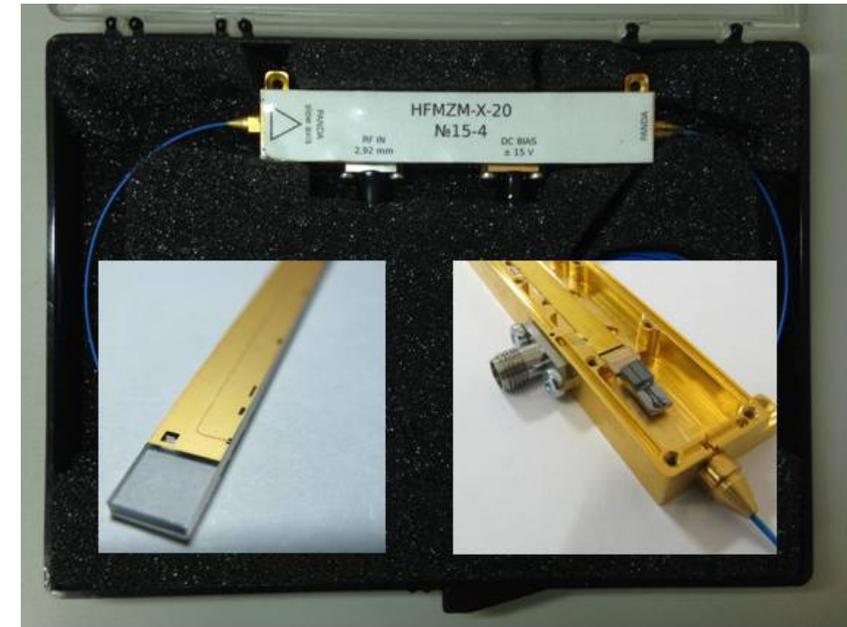
## Амплитудный модулятор Маха-Цендера

- Оптические потери 4,1 дБ
- Полуволновое напряжение  $V_{\pi} = 6,2$  В
- Полоса частот 5 ГГц

# Сверхширокополосные модуляторы для телекоммуникаций и радиофотоники

## Сегодняшний уровень (2022 г.)

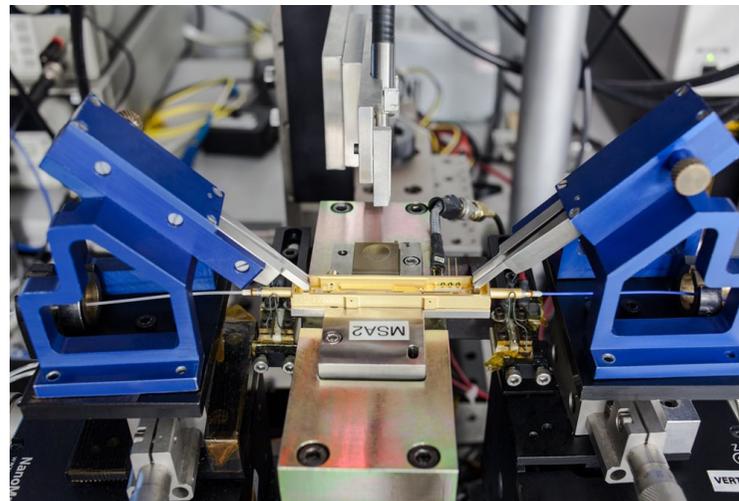
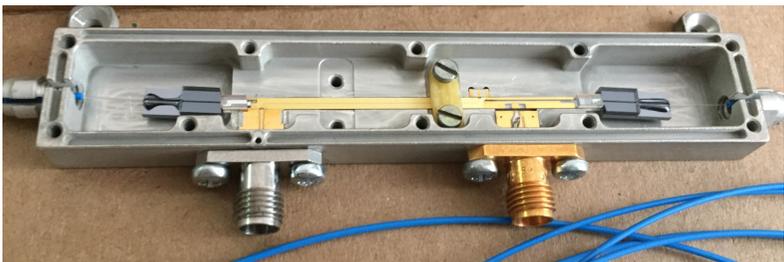
- Модуляция всех параметров оптического излучения: амплитуда, фаза, поляризация
- Оптические потери с учетом стыковки с оптическим волокном:
  - 1,5 дБ** для фазового модулятора
  - 3,5 дБ** для амплитудного модулятора
- Полоса частот: **> 25 ГГц**  
*для электродов используется оригинальная технология гальванического осаждения серебра с последующим золочением*
- Низкое полуволновое напряжение
  - DC 6.5 В**
  - RF < 5 В**
- Контраст модуляции **> 20 дБ**  
*оригинальная техника лазерной подстройки позволяет повысить контраст до 50 дБ*



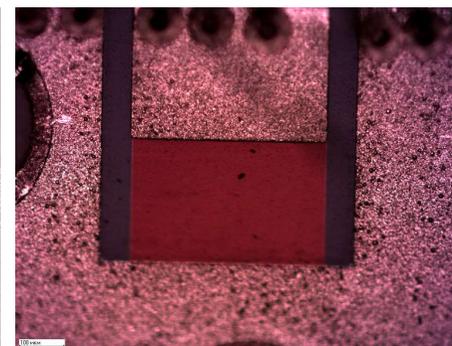
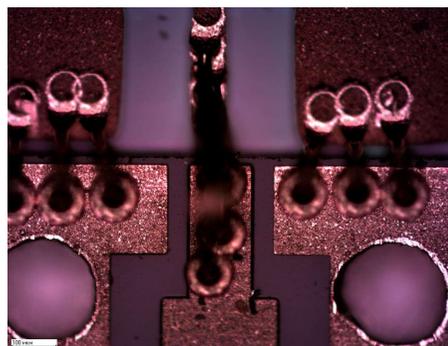
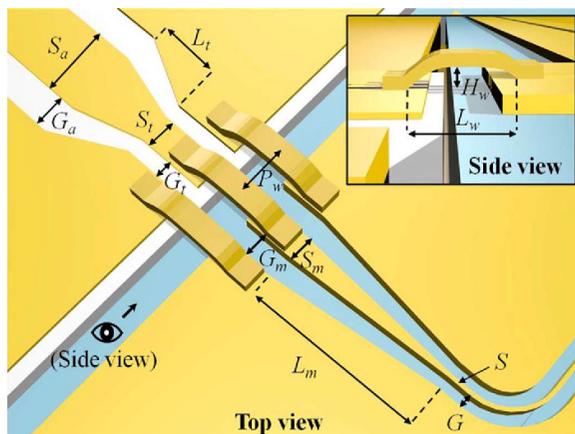


# Улучшение характеристик

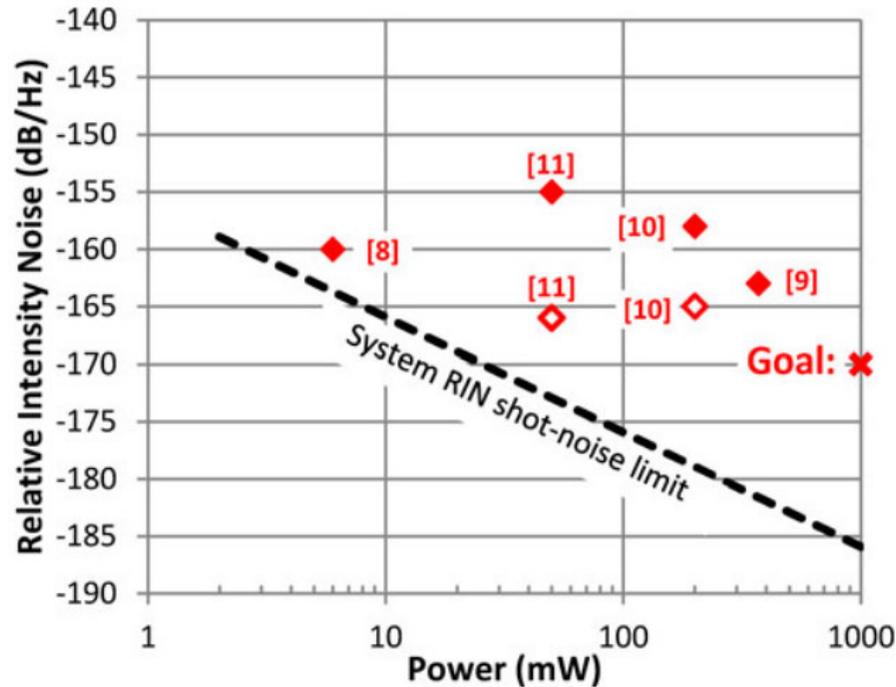
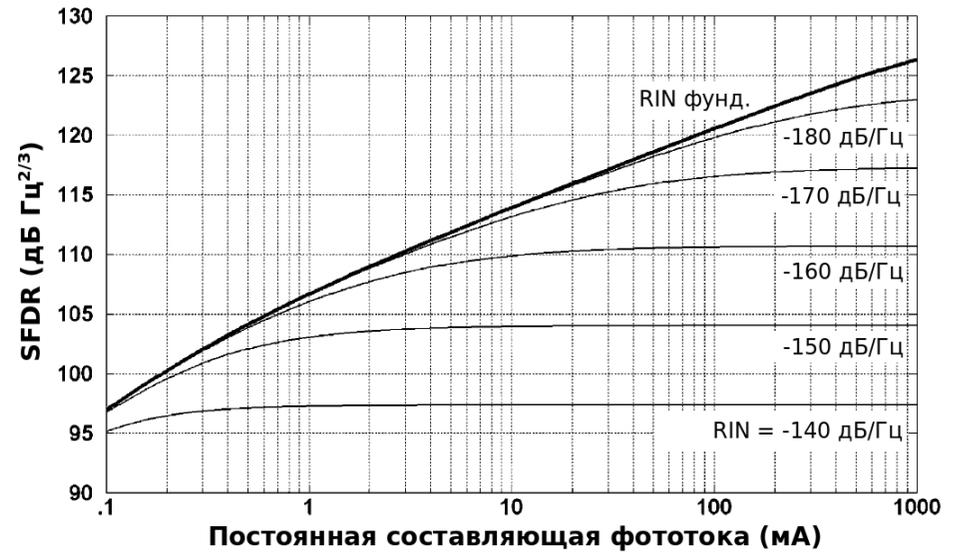
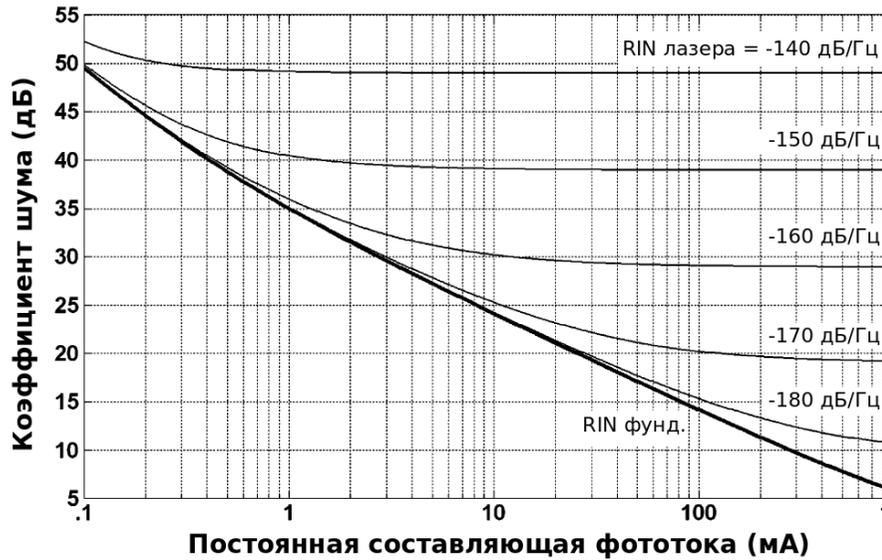
Герметичный корпус



Анализ оптимальной конфигурации переходной платы и резистора согласованной нагрузки

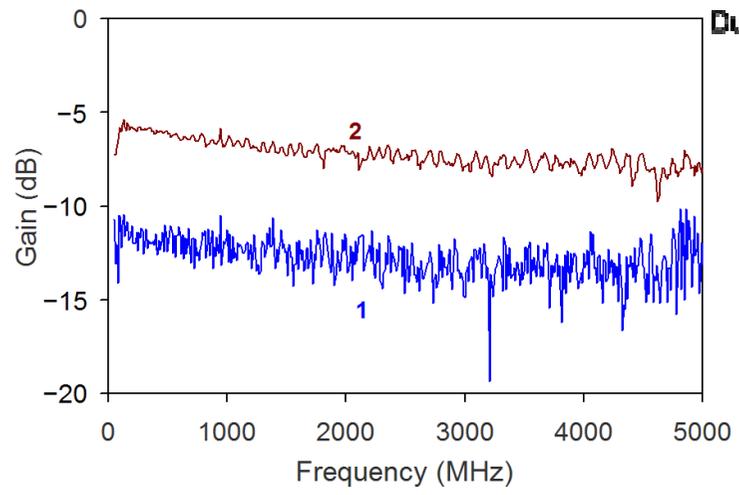
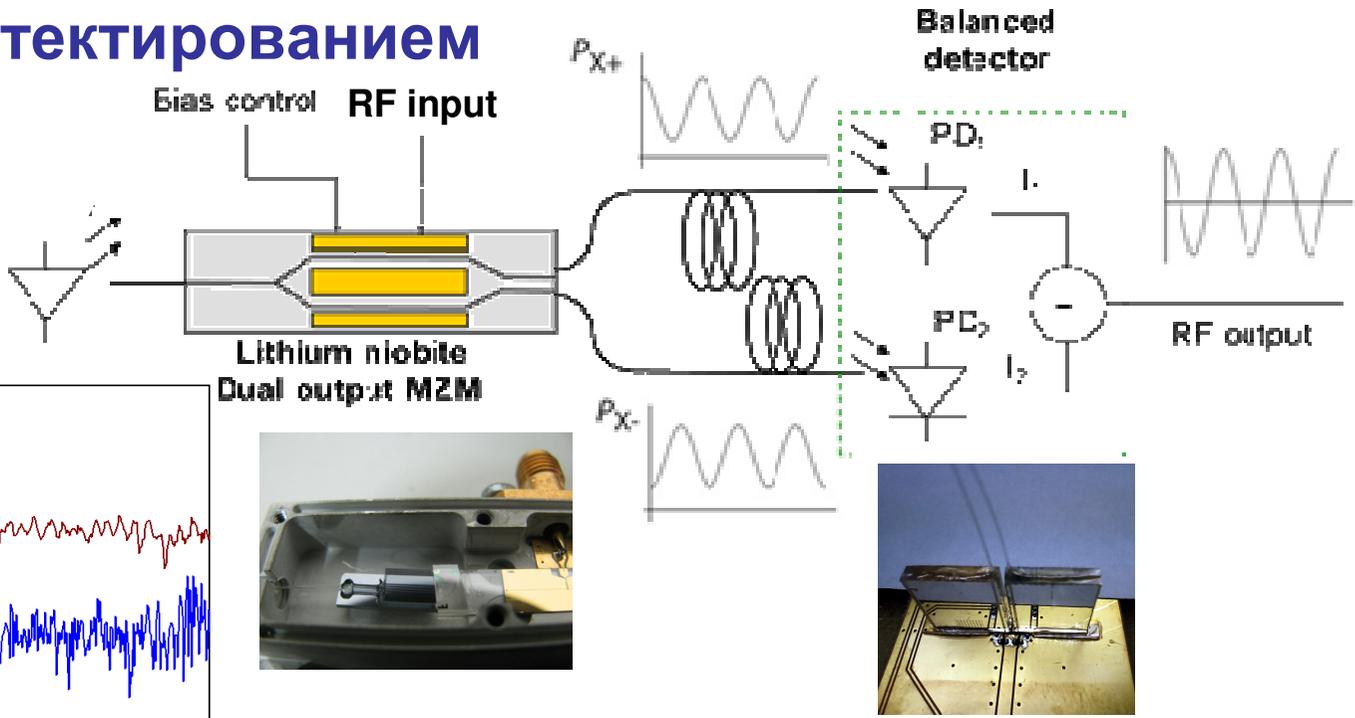


# Снижение уровня шума

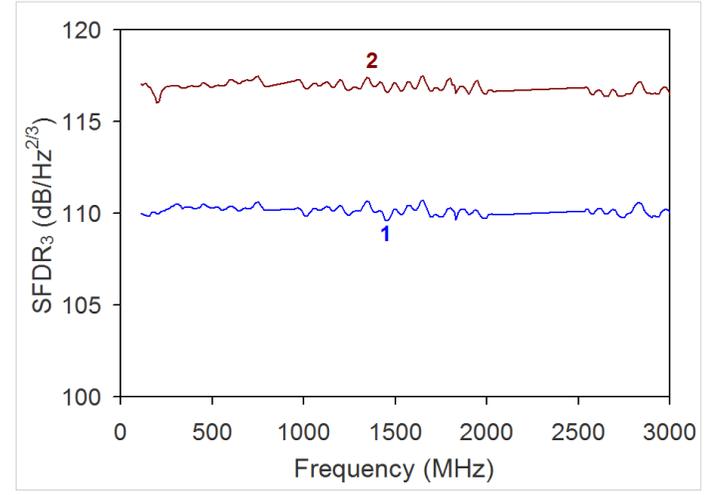
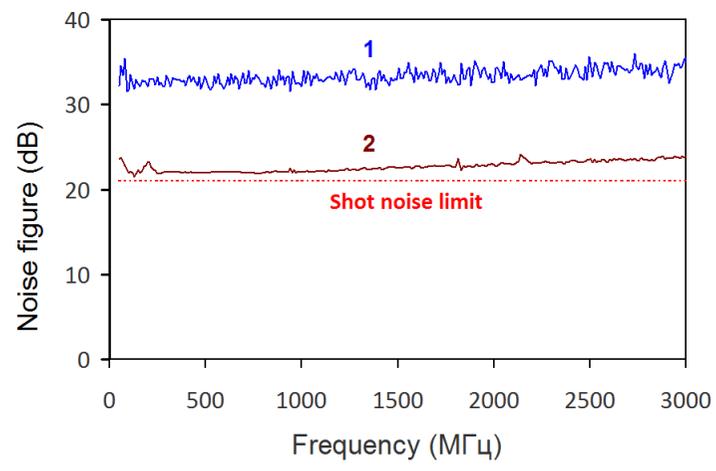


R. W. Ridgway, C. L. Dohram,  
J. A. Conway, "Microwave  
Photonics Programs at  
DARPA", J. Lightwave  
Technol., 32, pp. 3428-3439  
2014.

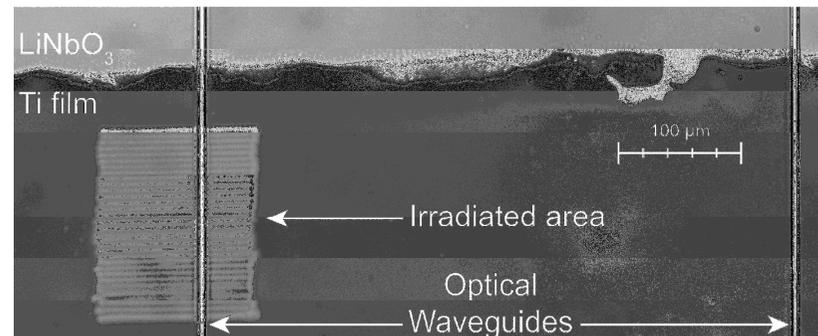
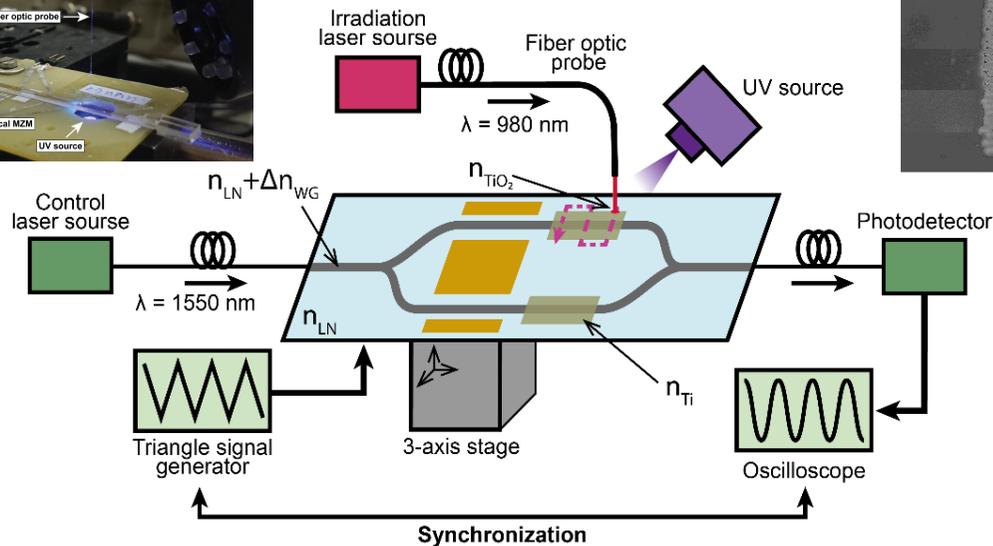
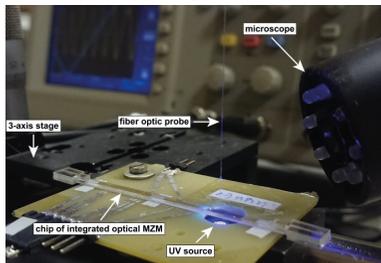
# Модулятор с двойным выходом для линии с балансным детектированием



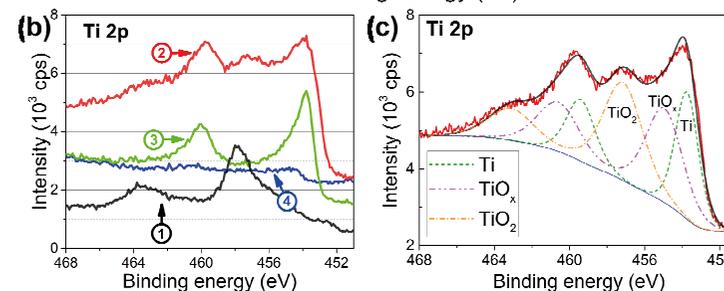
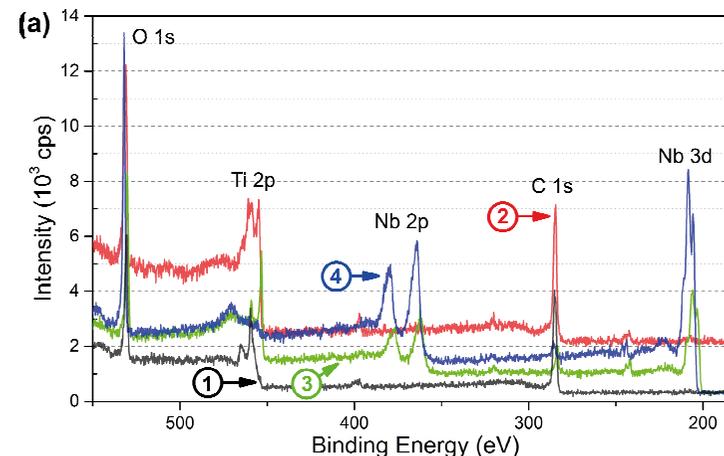
Характеристики близкие к пределу дробового шума



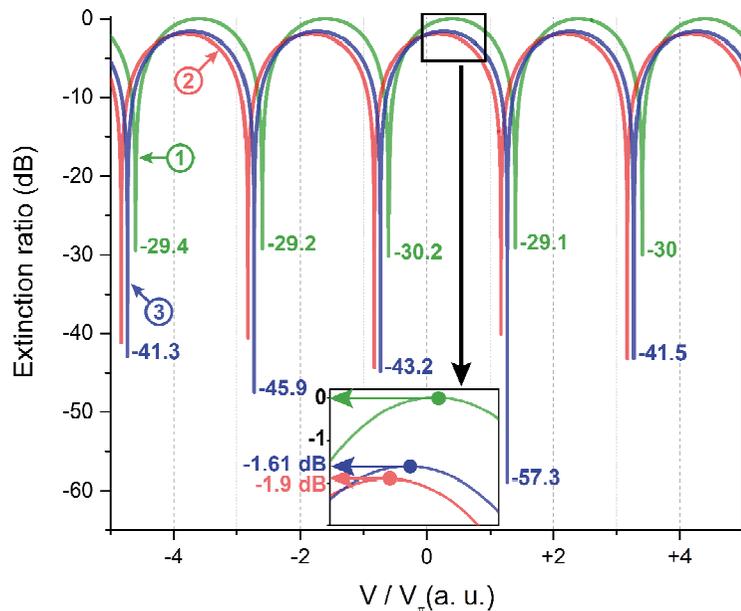
# Лазерный тримминг



XPS spectra of irradiated 100 nm titanium film



Enhancement of extinction ratio in the MZM



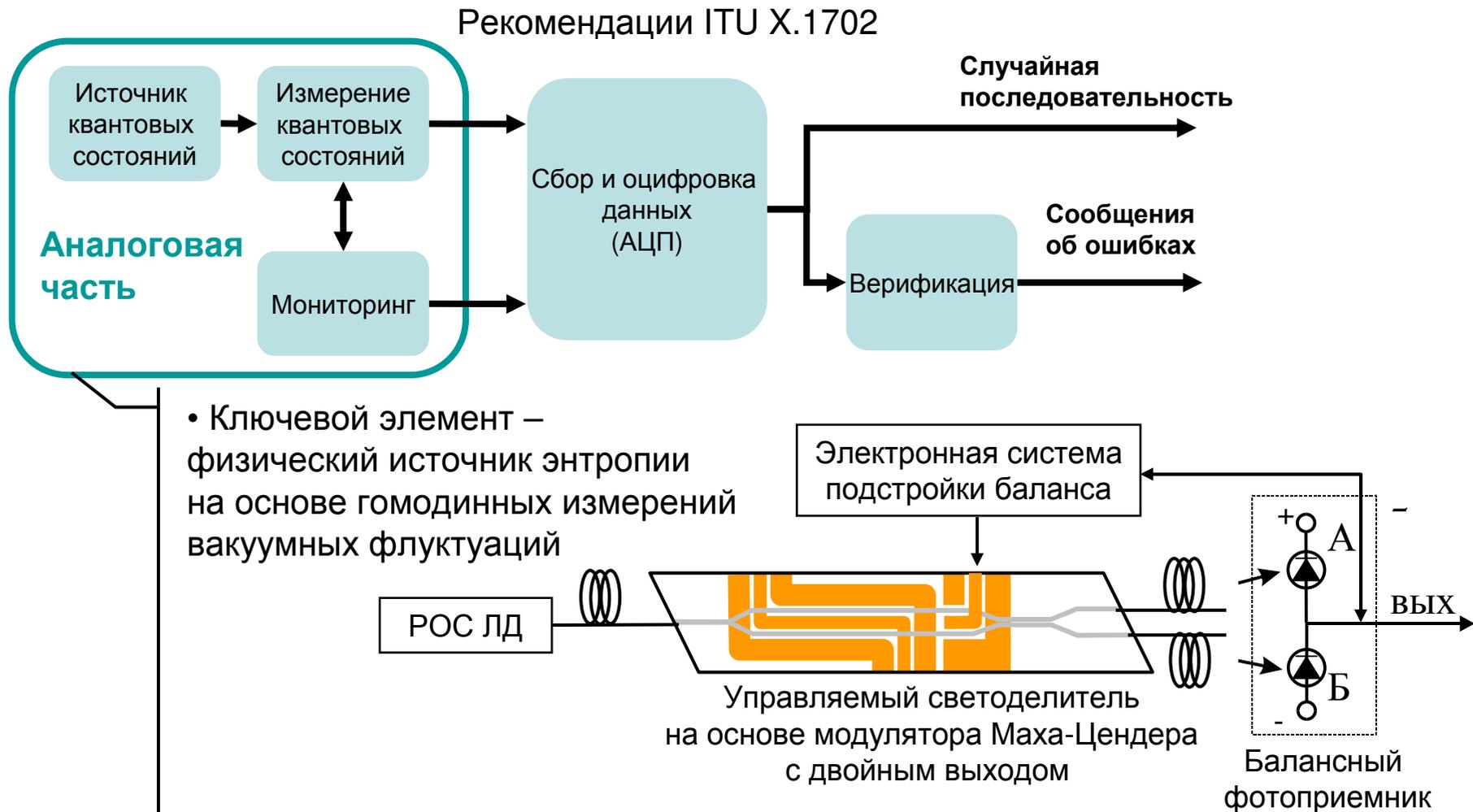
Патент РФ № 2646546 от 05.03.2018

Патент РФ № 187990 от 26.03.2019

M.V. Parfenov, et al, Appl. Phys. B Vol.126, ArtNo: #93 (2020)

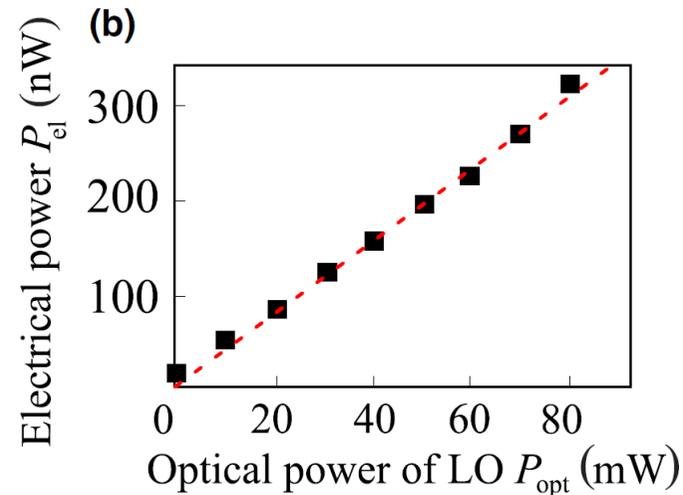
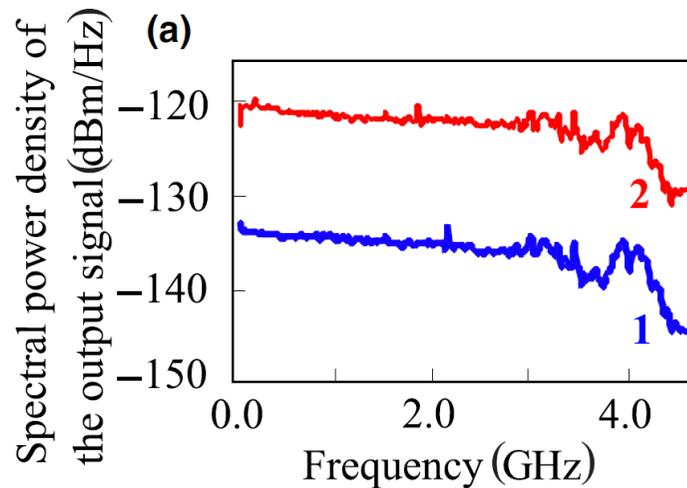
A.V.Tronev, et al, Opt. Mater. Express Vol.12, p. 4072 (2022)

# Квантовый генератор случайных чисел



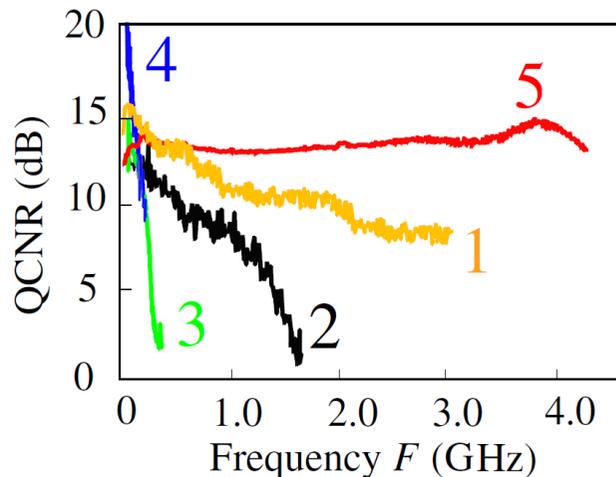
Активная стабилизация позволяет достичь точного баланса и высокой степени подавления классических шумов в широком спектральном диапазоне

# Экспериментальная реализация физического источника энтропии



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

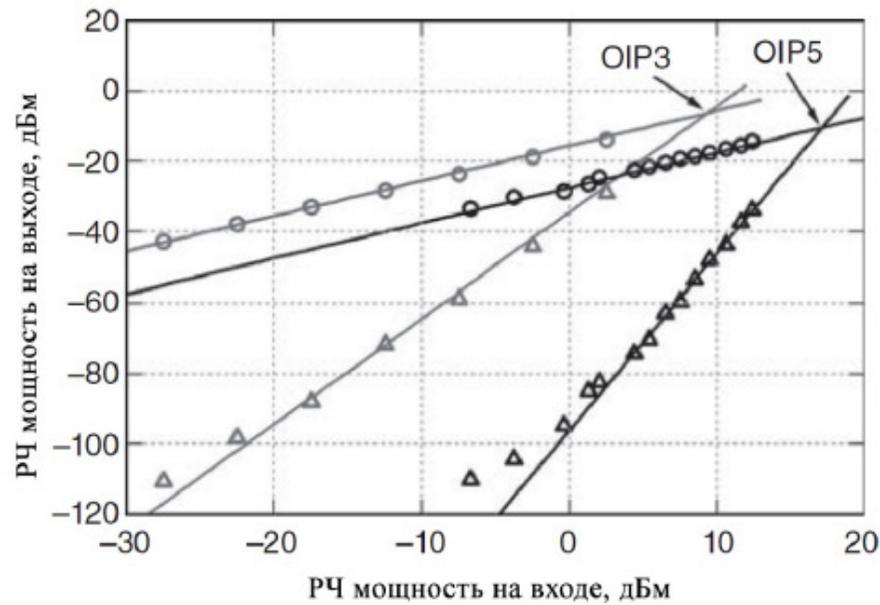
ИТМО



- 1 – The Australian National University with National University of Singapore
- 2 – State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University
- 3 – Center for Quantum Information, Tsinghua University, Beijing
- 4 – State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University
- 5 – Ioffe Institute with Saint Petersburg State University and ITMO University

E.A.Vashukevich, et al, Phys. Rev. Appl. Vol.17, ArtNo: #064039 (2022)

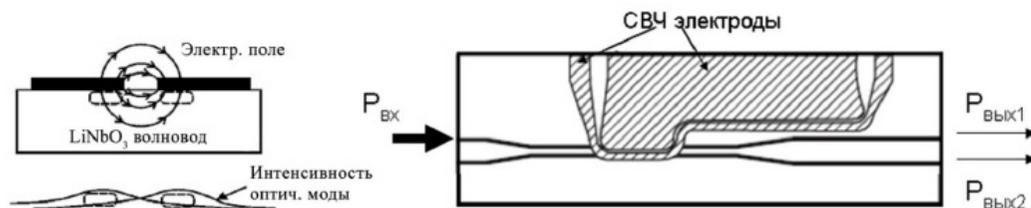
# Линеаризация



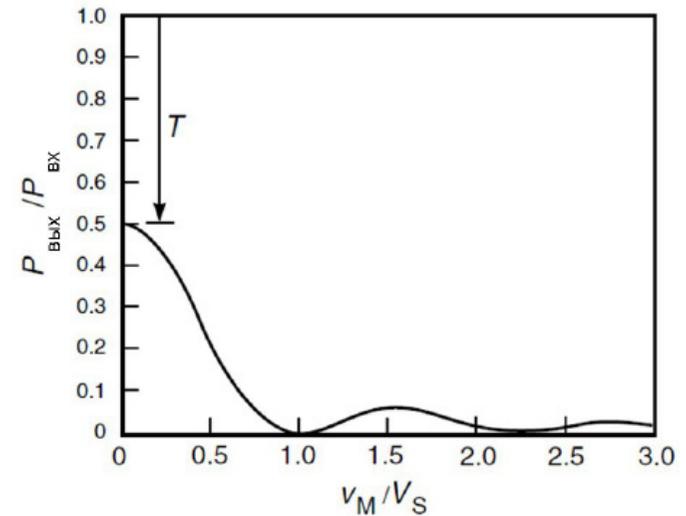
## Нужен специальный модулятор



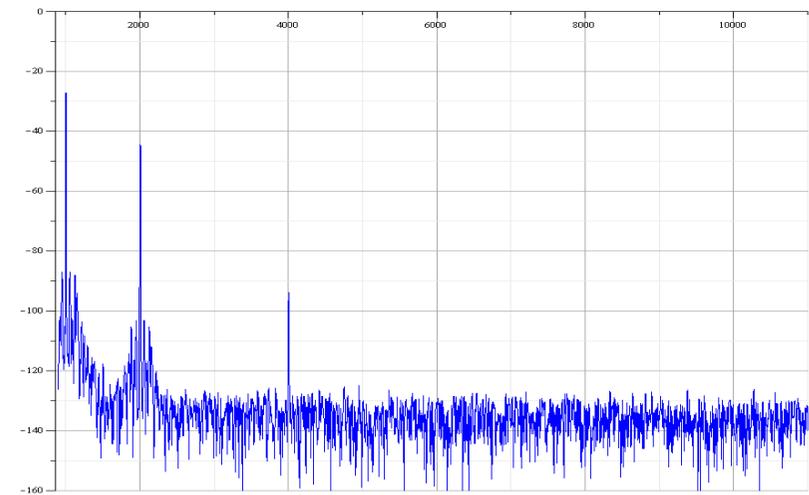
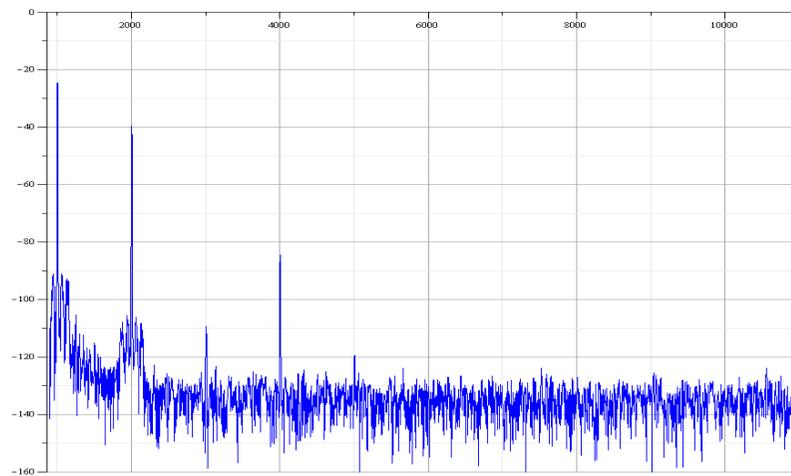
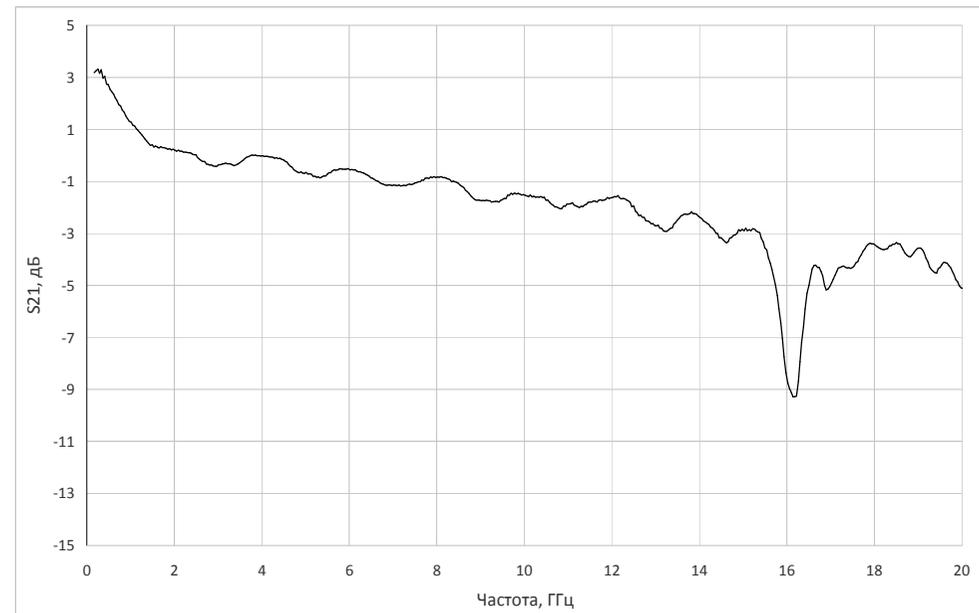
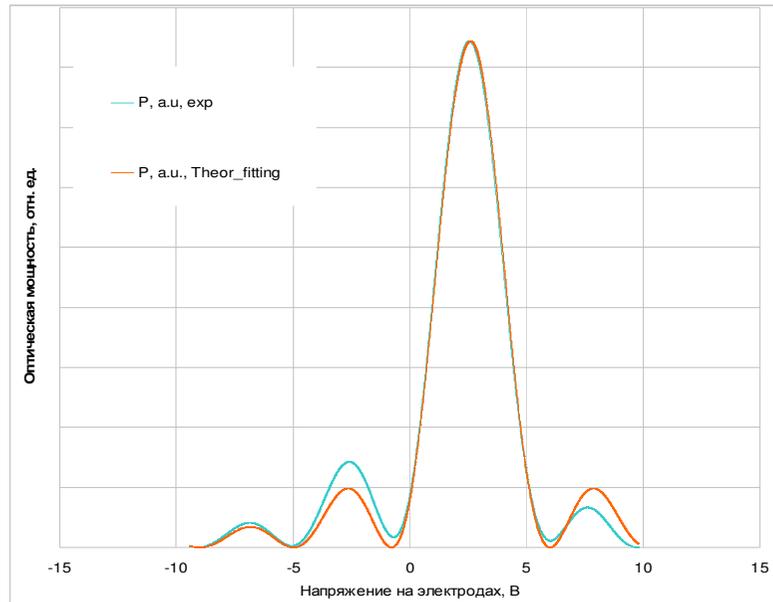
## Модулятор на основе направленного X-ответвителя



$$P_{вых2} = T \cdot P_{вх} \frac{\sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + 3 \left( \frac{v_M}{V_s} \right)^2} \right]}{1 + 3 \left( \frac{v_M}{V_s} \right)^2}$$

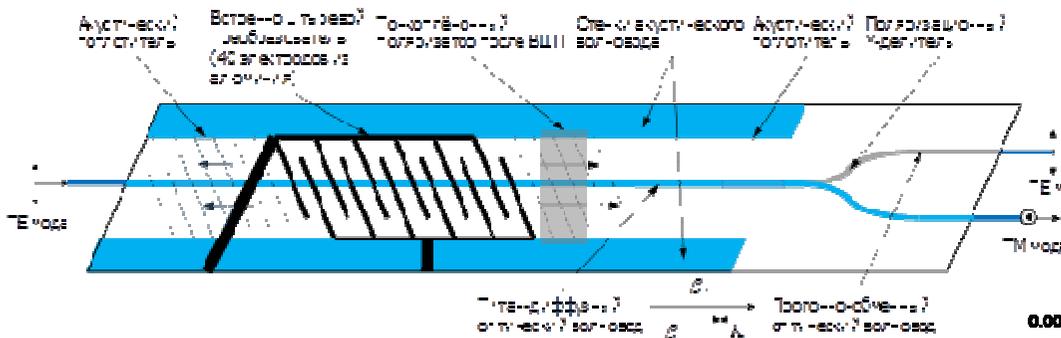
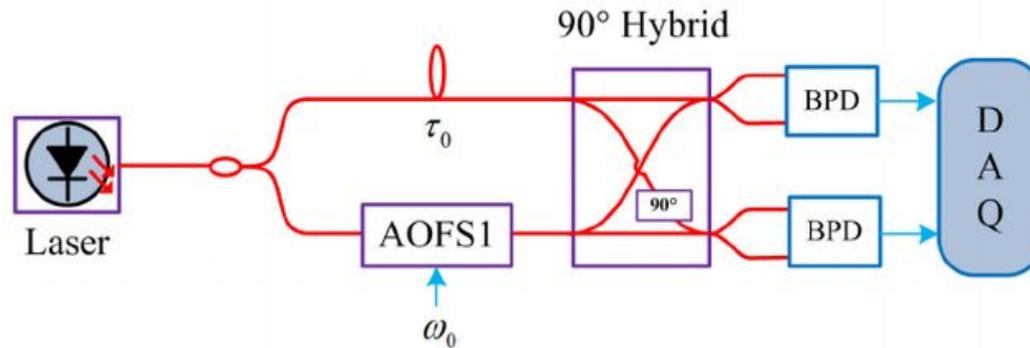


# Модулятор на основе направленного X-ответвителя



**В оптимальной рабочей точке и продемонстрировано интермодуляционных членов третьего порядка.**

# Акустооптический модулятор сдвига частоты



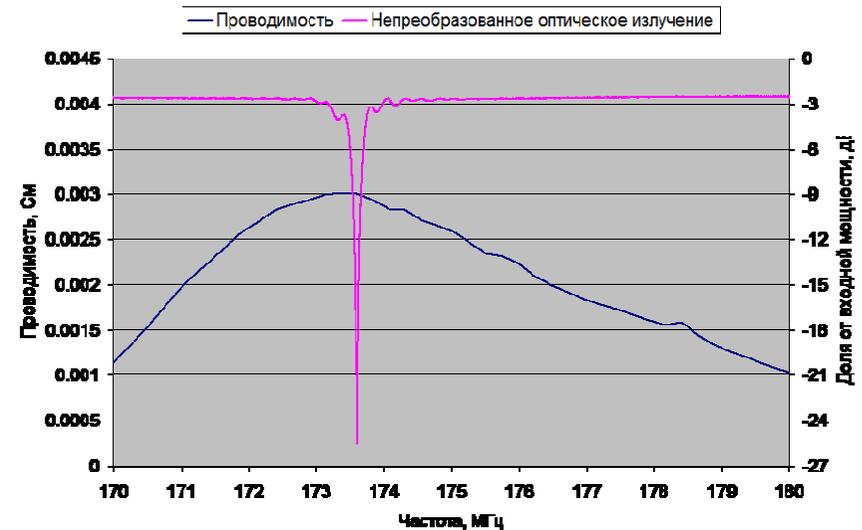
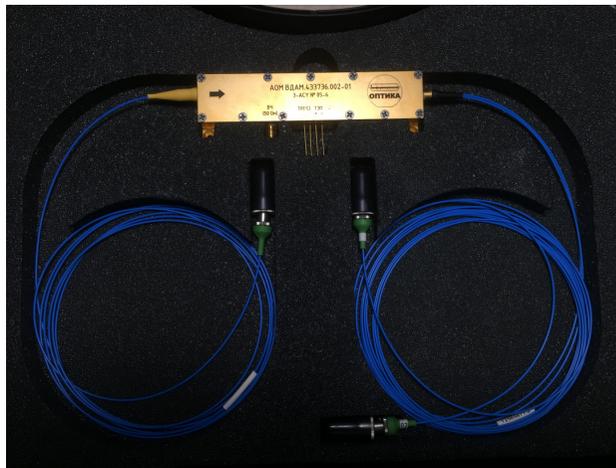
Диапазон рабочих длин волн – 1530...1560 нм

Частотный сдвиг – 173 МГц

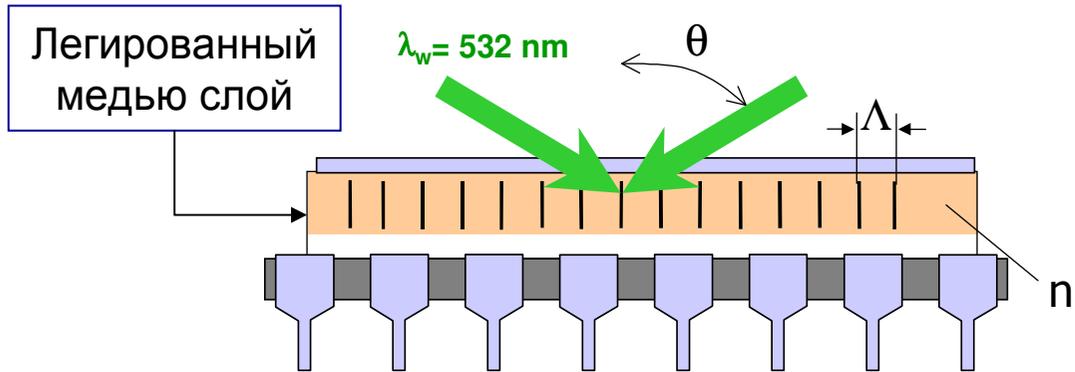
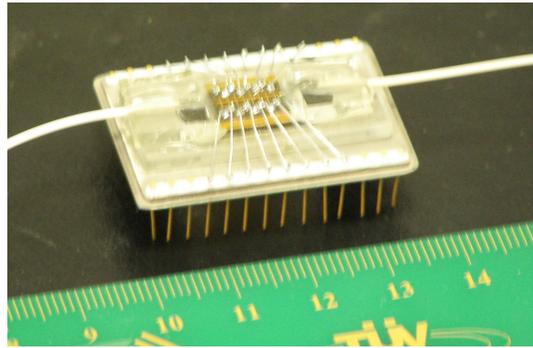
Мощность РЧ сигнала < 60 мВт

Оптические потери < 4.5 дБ

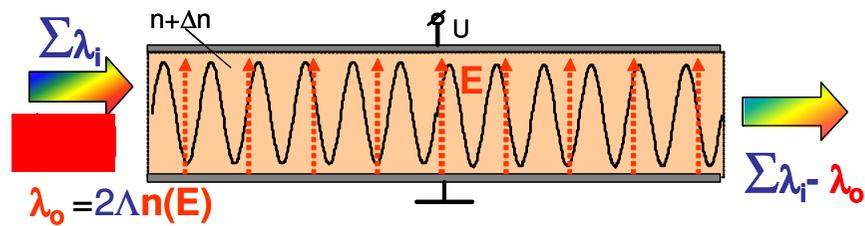
Перекрестные помехи < - 20дБ



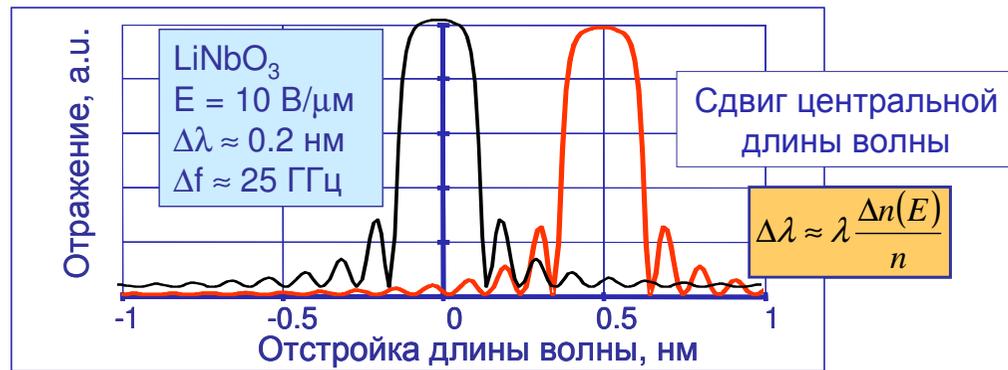
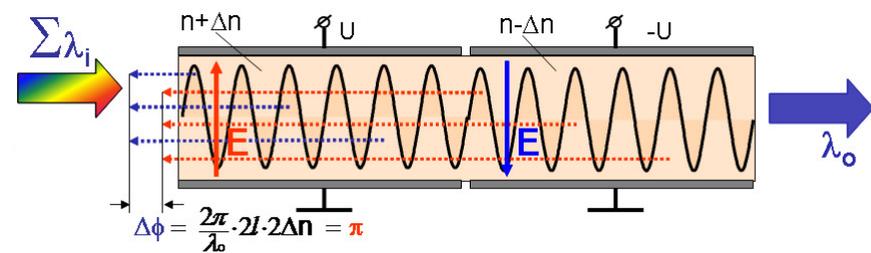
# Электрооптическое управление волноводной решеткой Брэгга



## Однородное электрическое поле



## Неоднородное электрическое поле

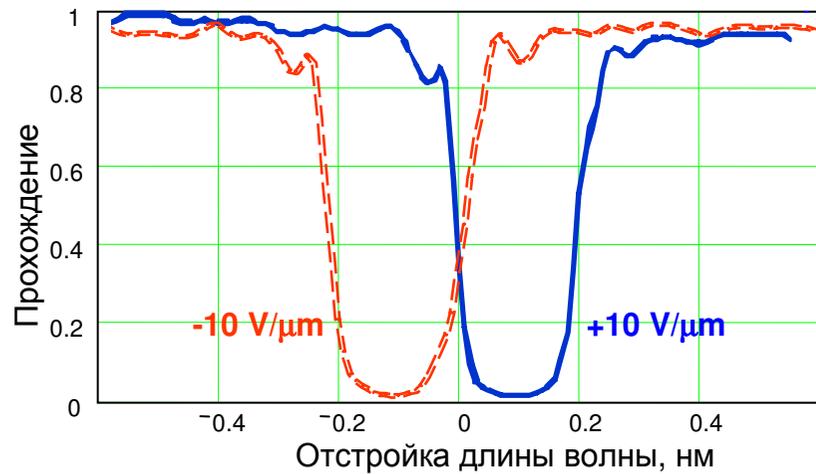


Шамрай А.В. и др. // Квантовая электроника— 2005 - т. 35 – С.734-740.

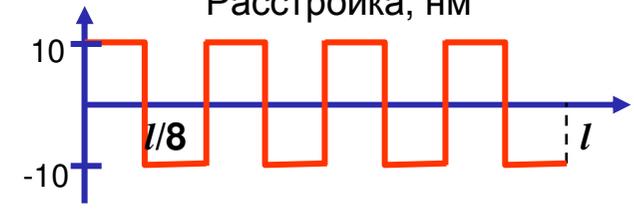
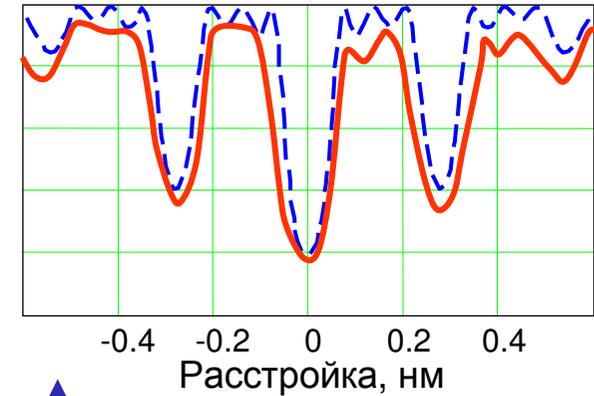
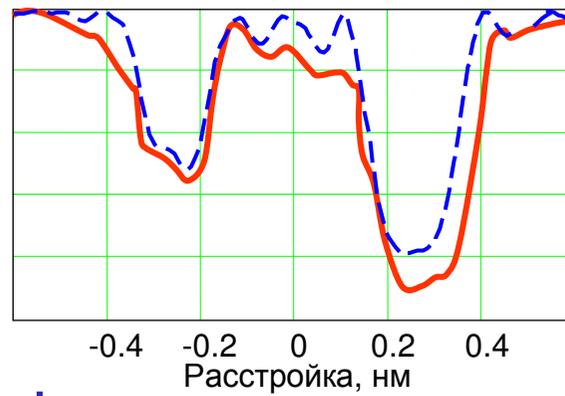
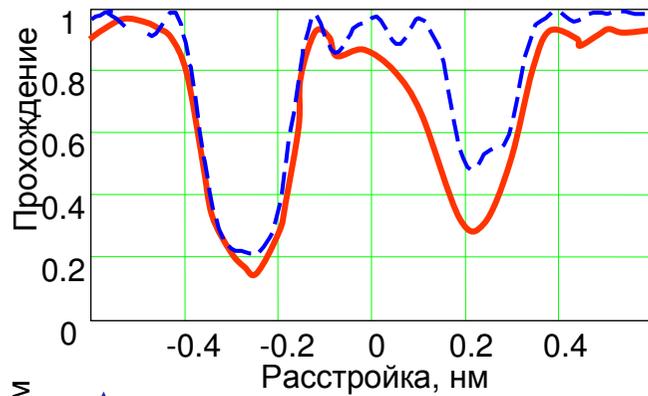
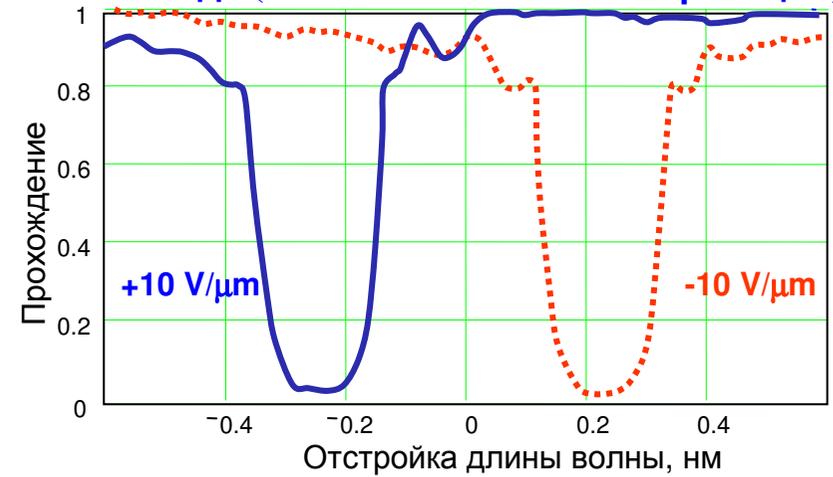
Петров М.П. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – т.30,– С.75-81.

# Электрооптическое управление волноводной решеткой Брэгга

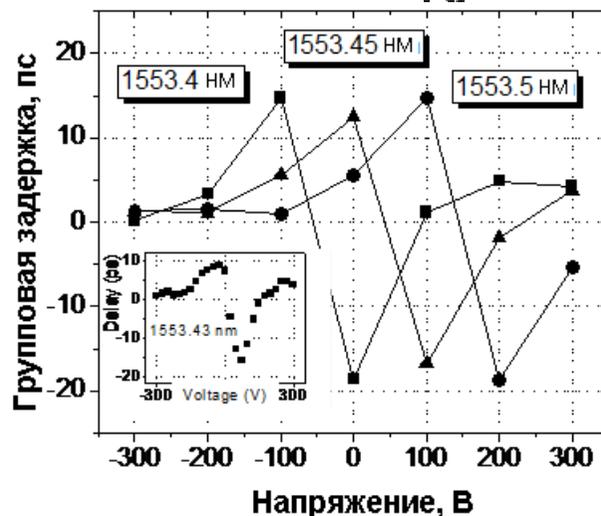
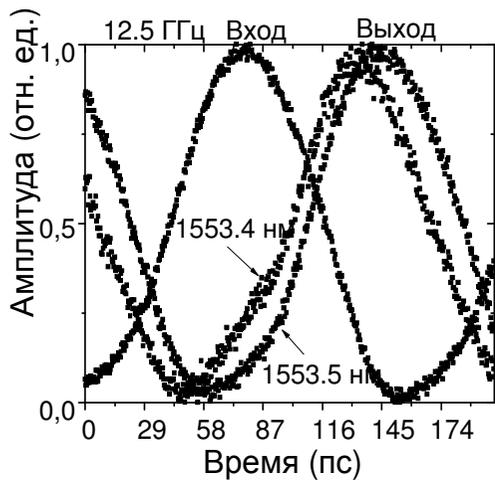
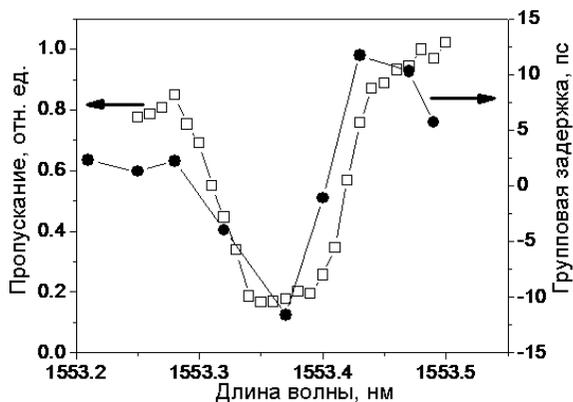
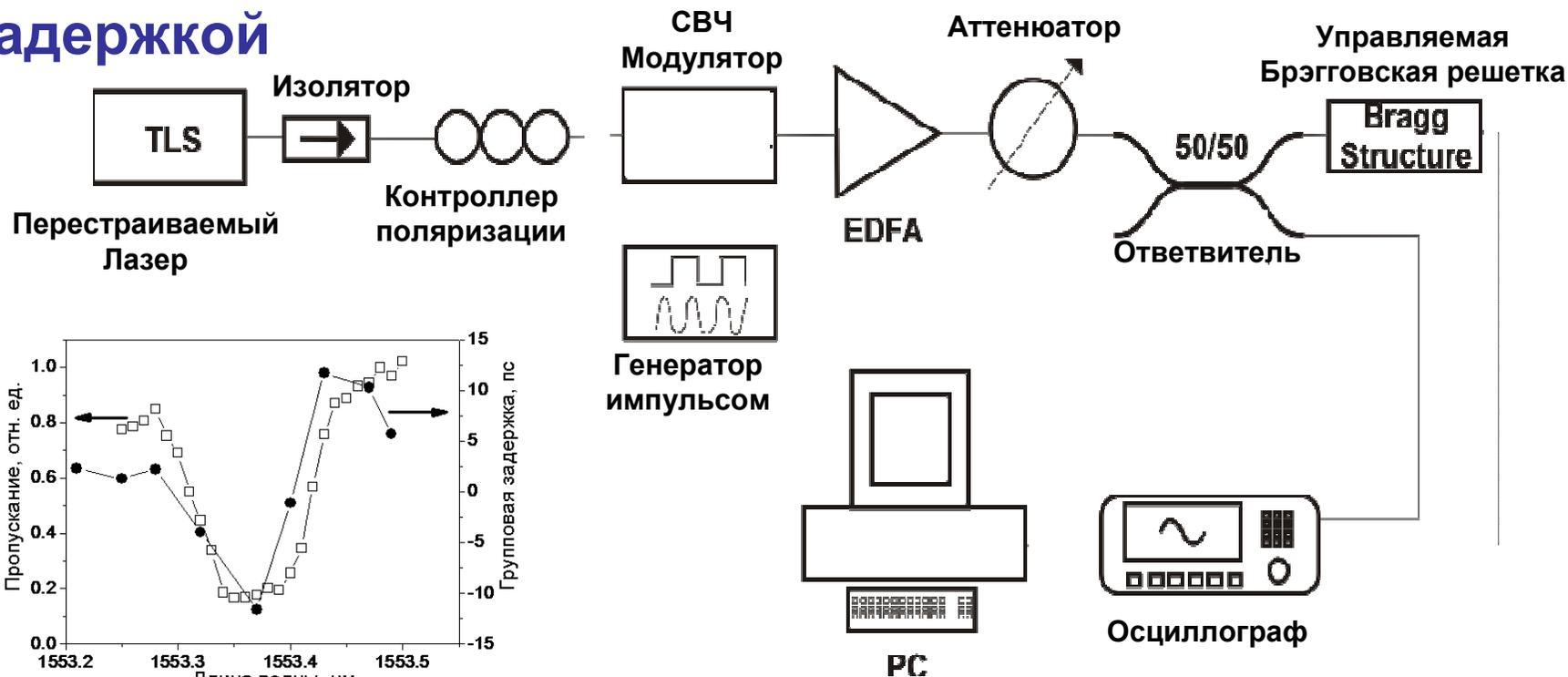
TM – мода (обыкновенная поляризация)



TE – мода (необыкновенная поляризация)

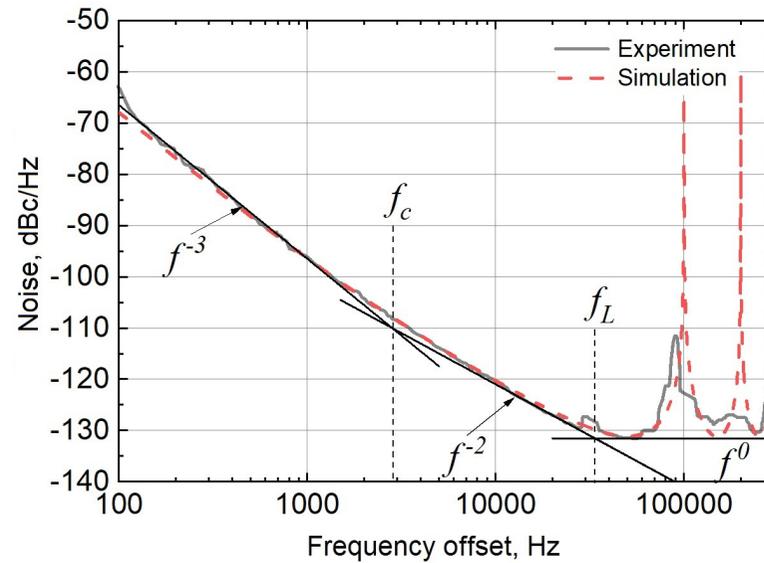
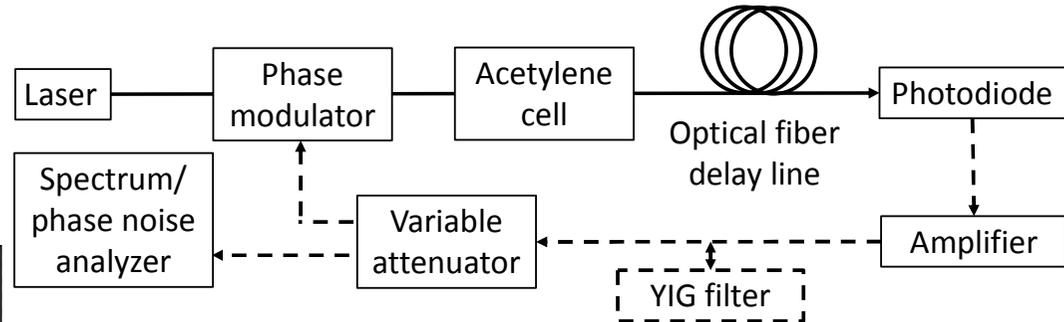
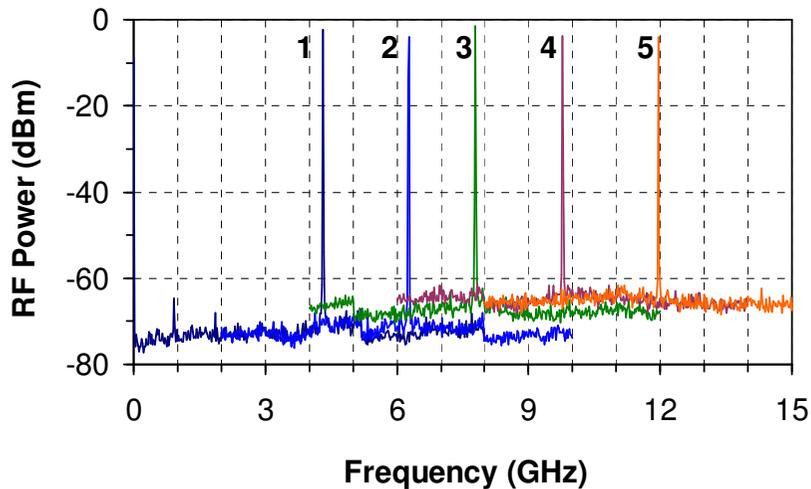
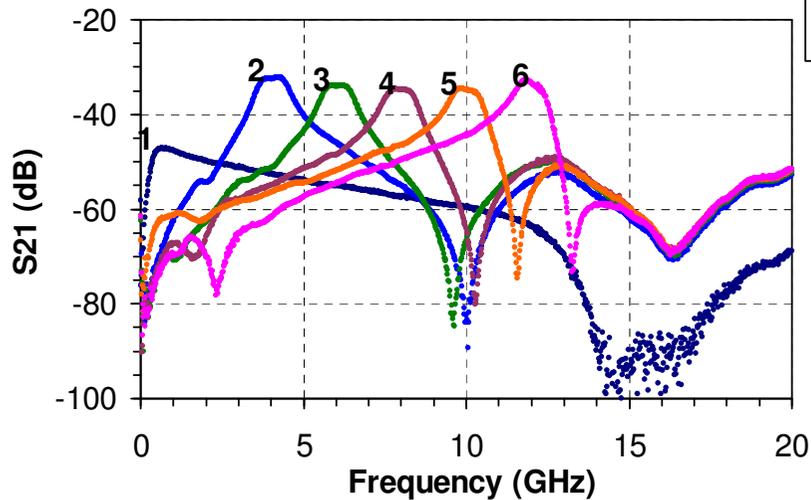


# Электрооптическое управление групповой задержкой



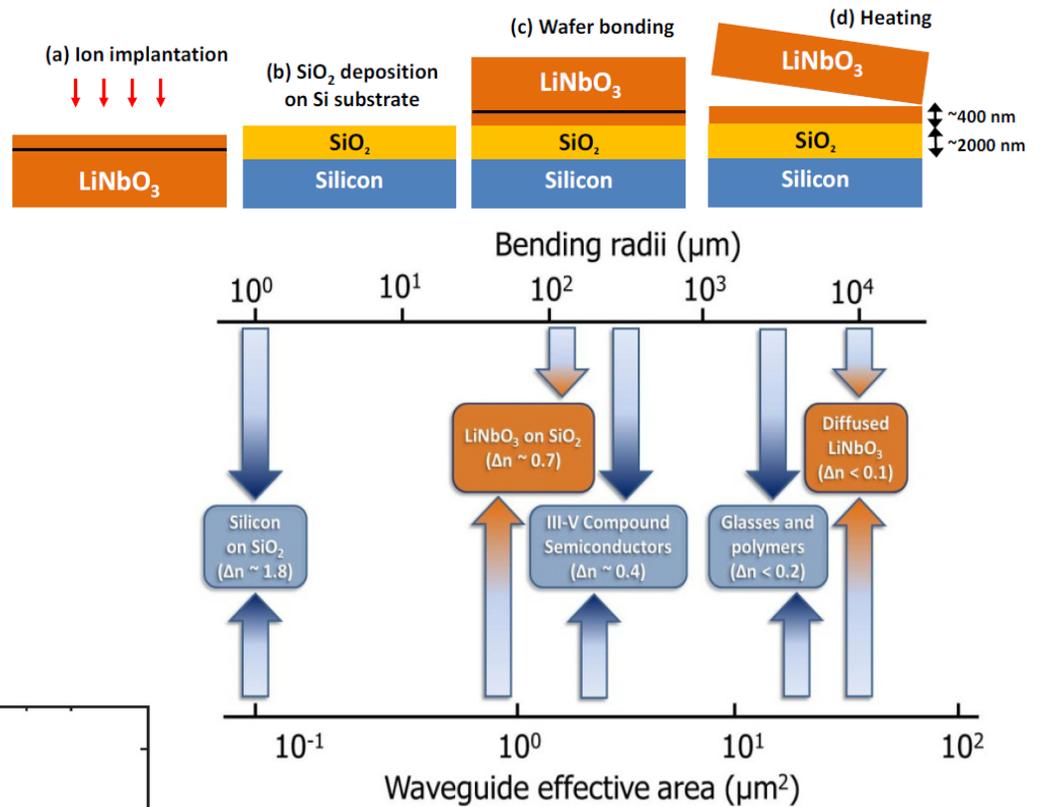
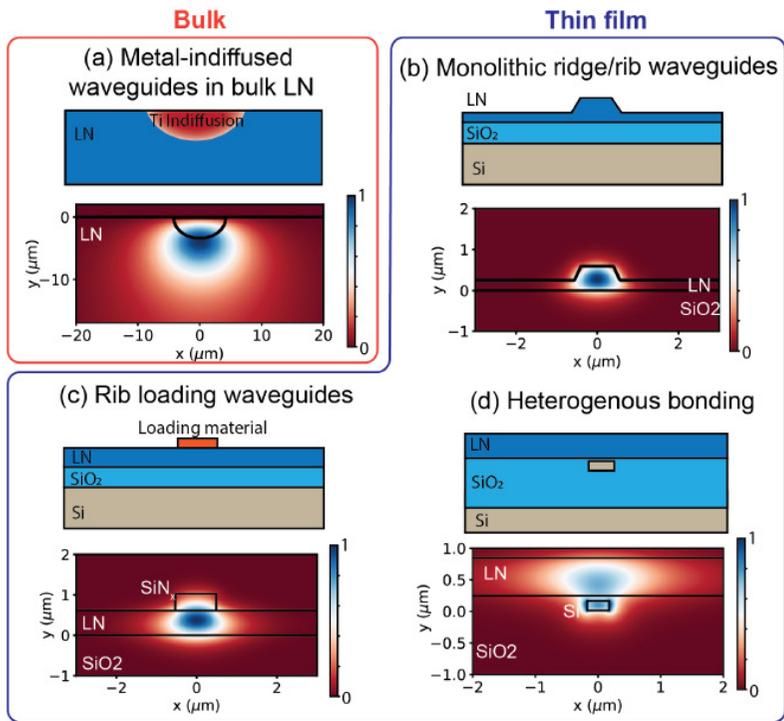
Диапазон изменения времени опережения/задержки составлял 40 пс или 0.5 τ.

# Фазовый модулятор в составе перестраиваемого оптоэлектронного СВЧ генератора

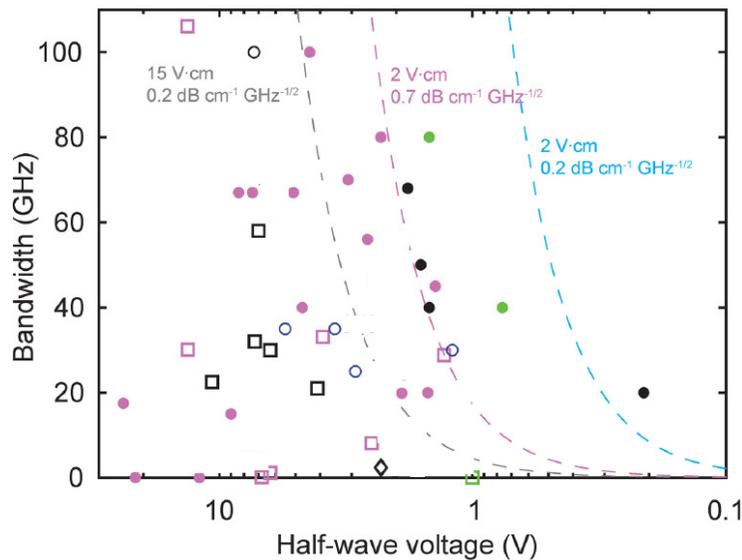


V. Lebedev , et al, Photonics. 2023; 10(2):196.  
<https://doi.org/10.3390/photonics10020196>

# Тонкопленочный ниобат лития



- Hybrid LNOI
- Monolithic LNOI
- SOI
- InP
- Plasmonic
- SOH
- ◇ BTO/Si
- Legacy bulk LN
- AlGaAs

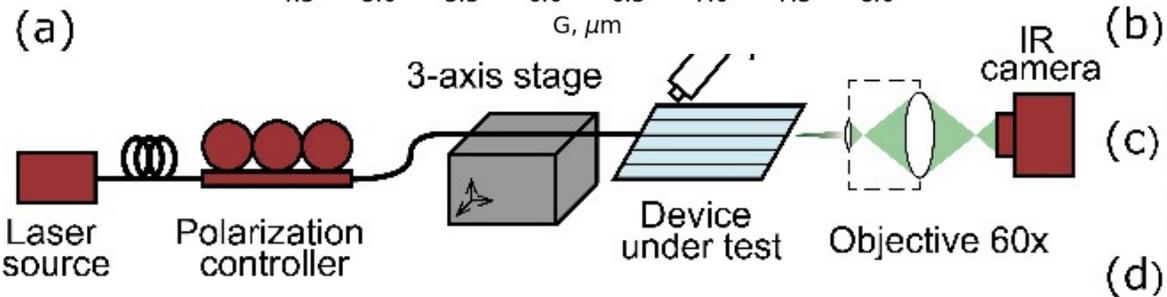
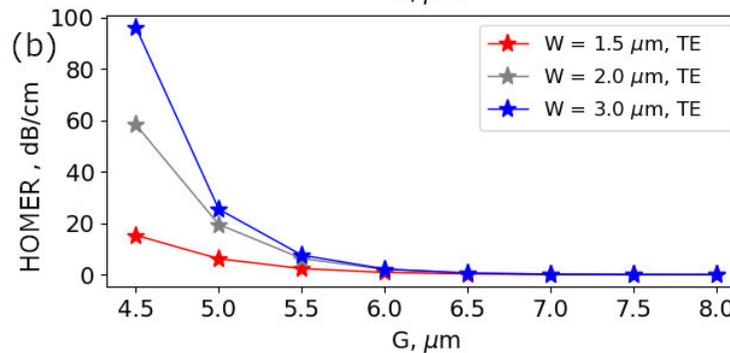
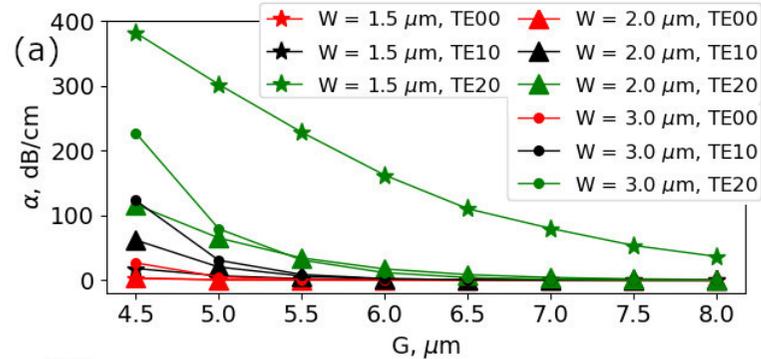
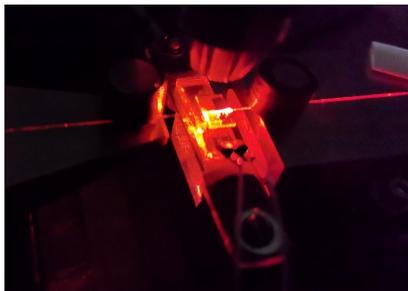
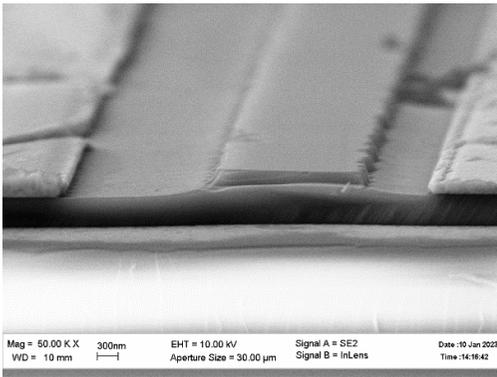
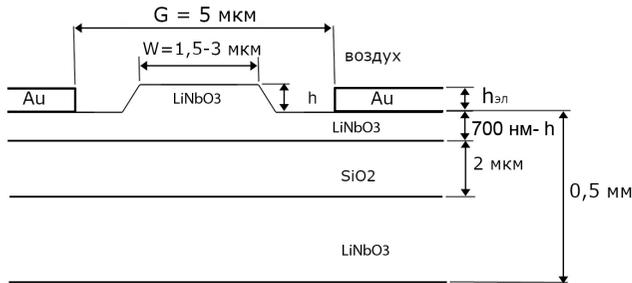


- Di Zhu, et al, Adv. Opt. Photon. 13, 242-352 (2021).
- Mian Zhang et al, Optica 8, 652-667 (2021).
- Y. Jia et al, Appl. Phys. Rev., vol. 8 no.1, 011307, (2021).

# Тонкопленочный ниобат лития

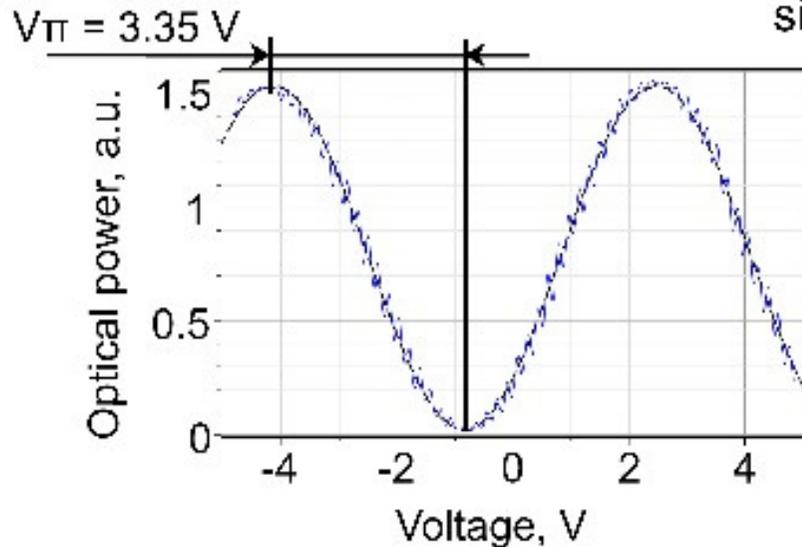
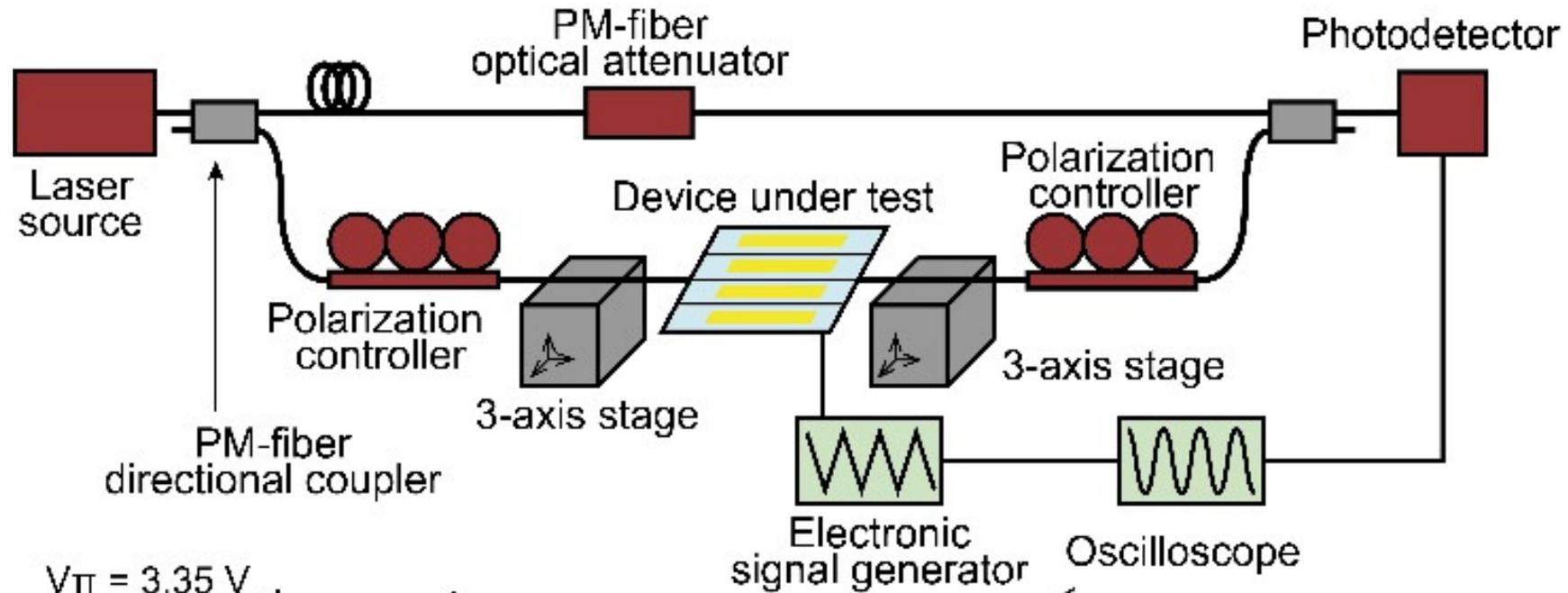
Фазовые модуляторы на тонкопленочном ниобате лития изготовленные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с использованием контактной фотолитографии

Стендовый доклад 2-40 (1413287143) Парфенов М.В.



# Тонкопленочный ниобат лития

Фазовые модуляторы на тонкопленочном ниобате лития, изготовленные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с использованием контактной фотолитографии



$$V_{\pi} = 3,35 \text{ B}$$
$$L = 12 \text{ мм}$$

$$V_{\pi}L = 4,02 \text{ B} \cdot \text{см}$$

в "push-pull" конфигурации  
около  $2 \text{ B} \cdot \text{см}$

## Заключение

- Ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) является одним из базовых материалов для изготовления интегральных электрооптических модуляторов. Низкий уровень вносимых шумов и возможность работы с уровнем оптической мощности в несколько сот милливатт являются их главными преимуществами по сравнению с модуляторами на основе других материальных платформ при использовании в аналоговых системах, таких как большинство систем радиофотоники.
- Помимо электрооптического эффекта ниобат лития обладает целым набором других эффектов: пьезоэлектрическим и акустооптическим, пироэлектрическим, нелинейным оптическим эффектом второго порядка, фоторефрактивным эффектом, позволяющих создавать на подложках ниобата лития сложные интегрально-оптические устройства с широким набором функций, и открывает новые возможности по генерации, передаче и обработке оптических сигналов.
- Лаборатория квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе является одним из лидеров в области интегральной оптики на подложках ниобата лития. Разработаны оригинальные технологические решения и целая линейка интегрально-оптических модуляторов, которые широко используются в системах обработки сигналов волоконно-оптических датчиков, системах радиофотоники, а также для распределения квантового ключа
- Дальнейшее развитие интегральной оптики на ниобате лития связано с использованием токопленочных структур, что позволяет значительно повысить скорость и эффективность управления оптическим излучением, а также открывает возможность создания гибридных фотонных интегральных схем.

## Благодарность

Исследования технологии волноводов на тонкопленочном ниобате лития проводятся при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-19-00511