

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

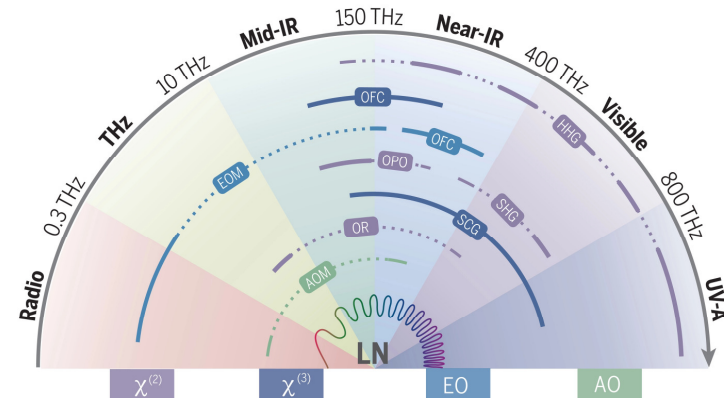
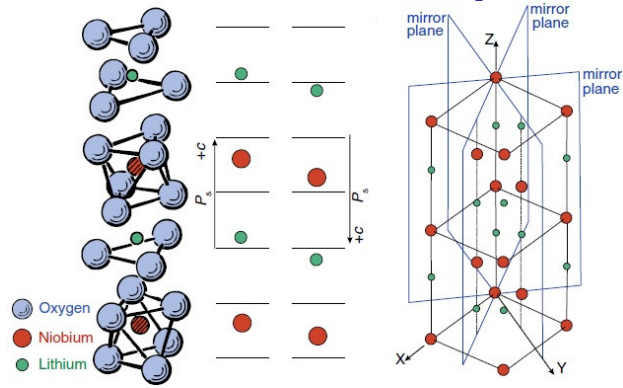
achamrai@mail.ioffe.ru

(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 (LiNbO_3)



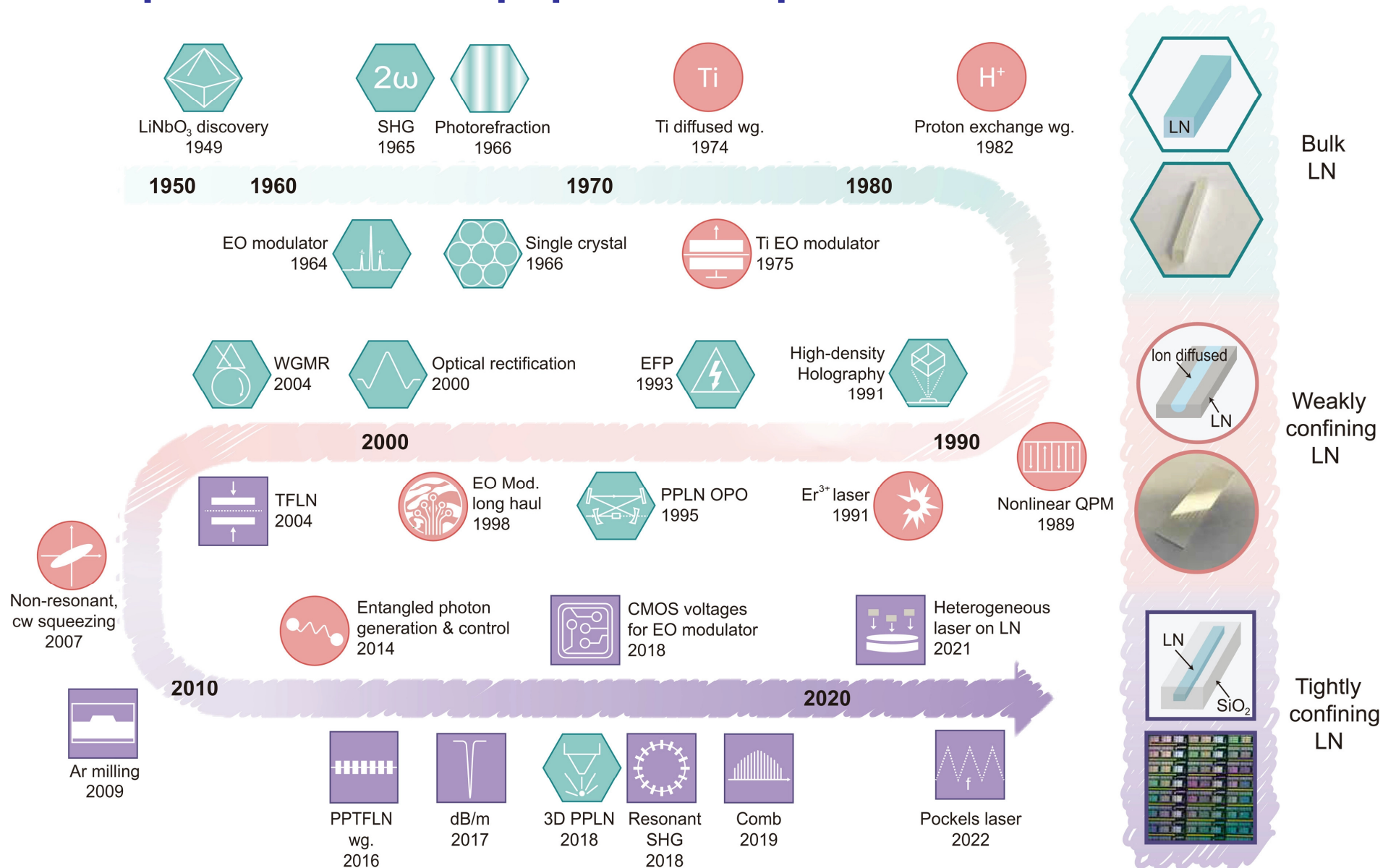
	A Optical nonlinearities $\chi^{(2)}$			B $\chi^{(3)}$	
Process	SHG second-harmonic generation	SFG sum-frequency generation	DFG difference-frequency generation	FWM non-degenerate four wave mixing	FWM degenerate four wave mixing
Example	frequency-doubled solid-state laser	sodium-yellow guide star	optical parametric oscillator	optical parametric amplifier	Kerr resonator
Spectrum	Frequency: ω to 2ω (octave)	Frequency: ω_1, ω_2 to $\omega_1 + \omega_2$	Frequency: ω_1, ω_s to ω_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

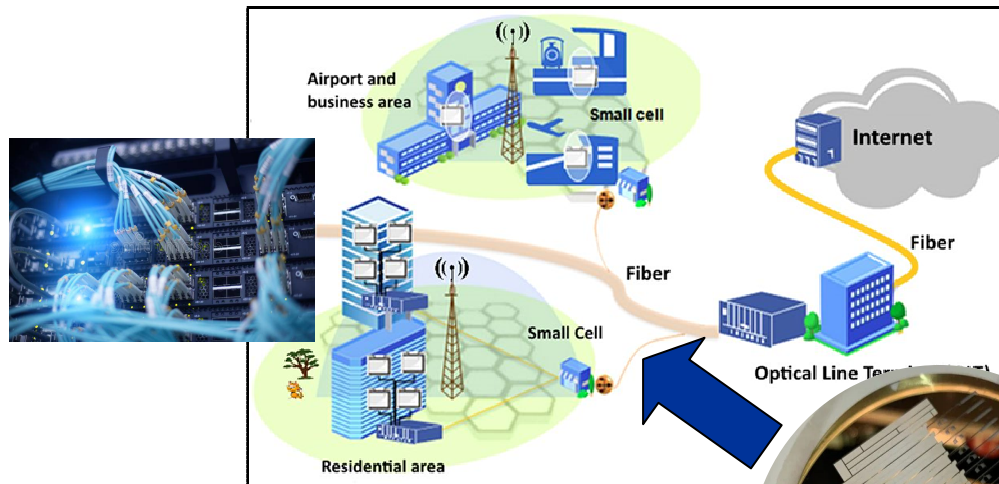
C Electro-optic effect			D Photo-elastic & Piezo-electric effect		
Process	index change due to electric field	Electro-optic Modulator	photo-elastic index change due to strain	piezo-electric electric field due to strain	Acousto-optic modulator
Example	LN with voltage source	LN with electrodes (G, S, G)	LN with strain	LN with piezo	Acousto-optic modulator
Spectrum	single / dual sidebands	wideband EO-combs	single sideband		

Ниобат лития (LiNbO_3) – материальная платформа интегральной оптики

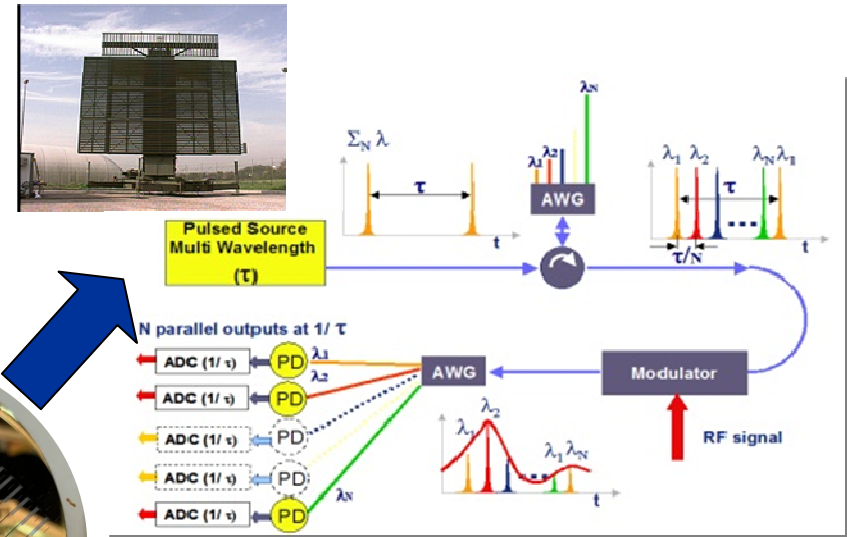


Области применения интегральной оптики на LiNbO₃

Телекоммуникации

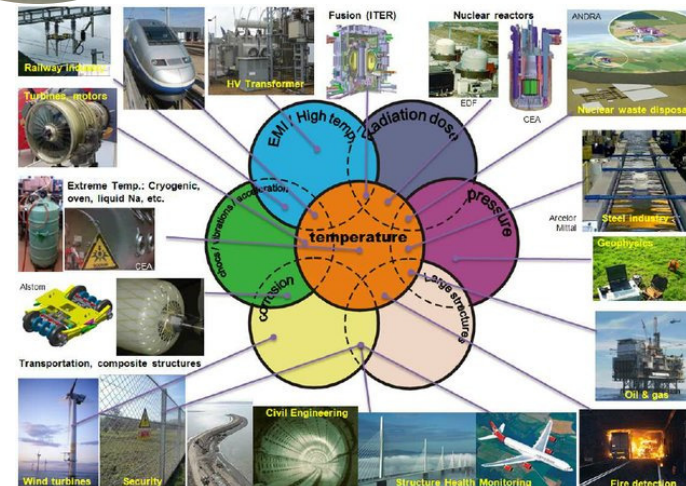
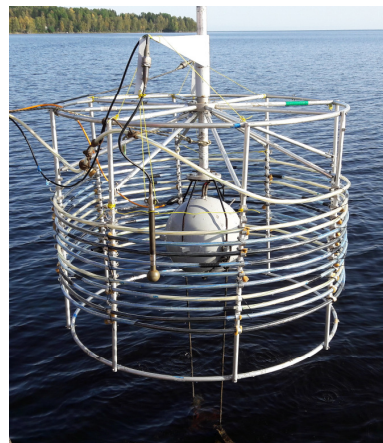


Радиофотоника



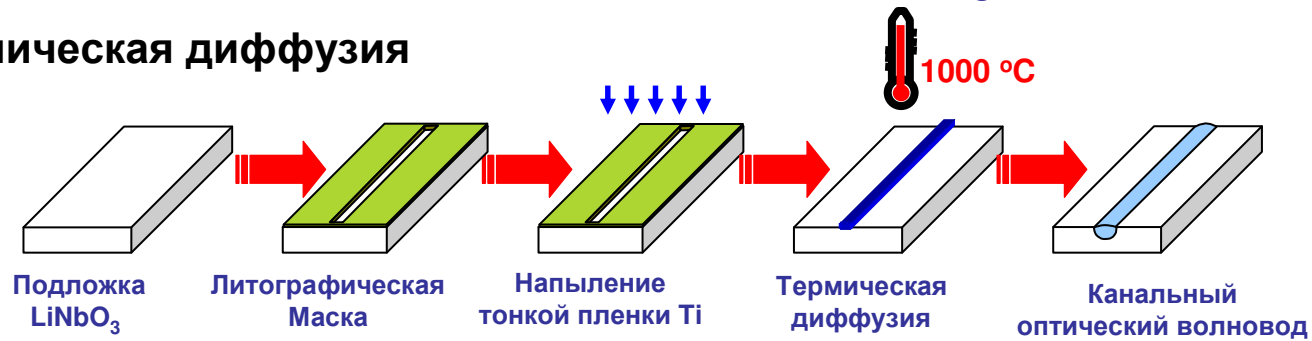
- Низкий уровень вносимых шумов
- Работа с высокой оптической мощностью

Волоконно-оптические датчики

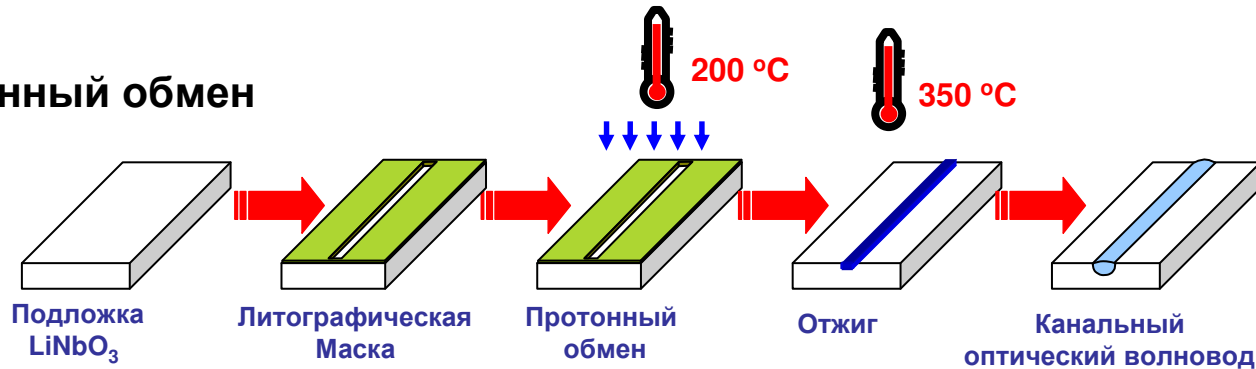


Технология оптических волноводов на кристаллических подложках LiNbO_3

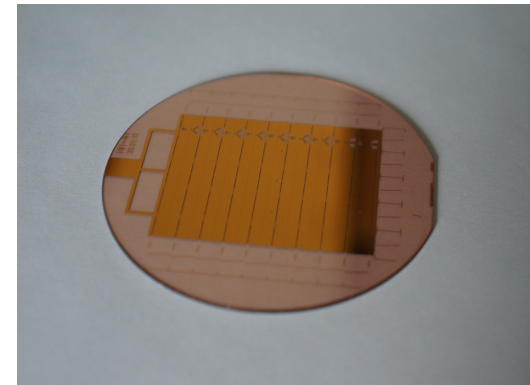
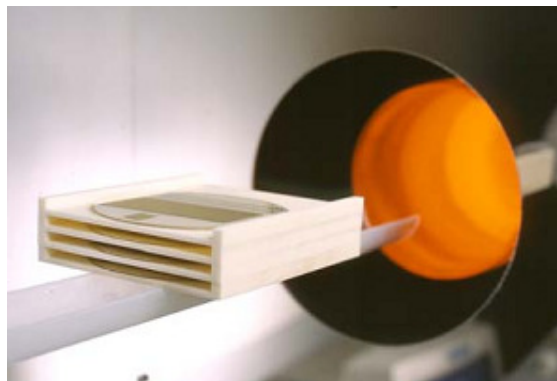
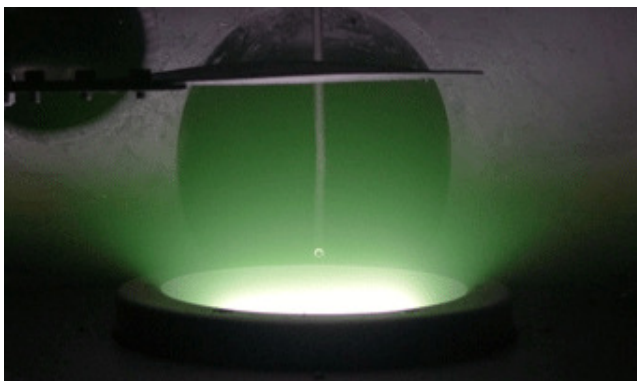
- Термическая диффузия



- Протонный обмен

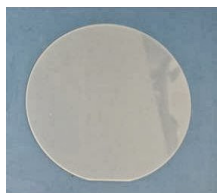


Пластины конгруэнтного ниобата лития



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

Вэйфер
7,62 мм



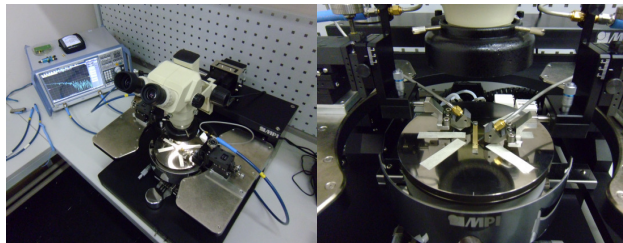
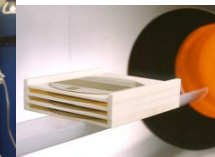
Фотолитография



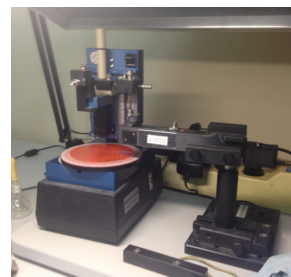
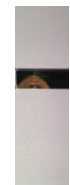
Магнетронное
напыление



Высокотемпературный
отжиг



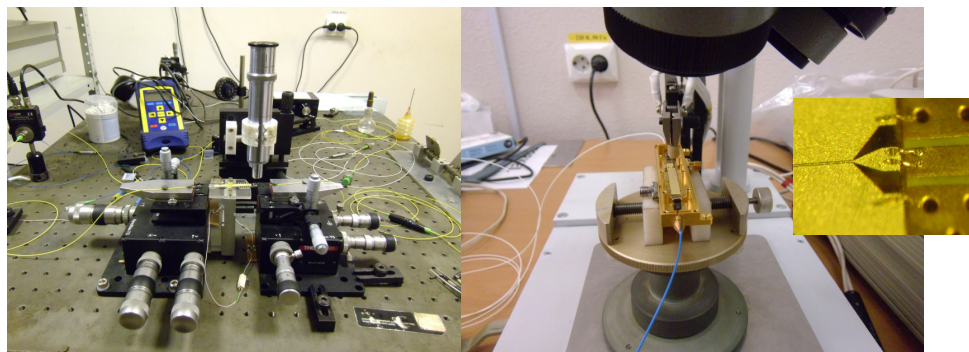
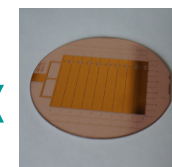
Тестирование чипов



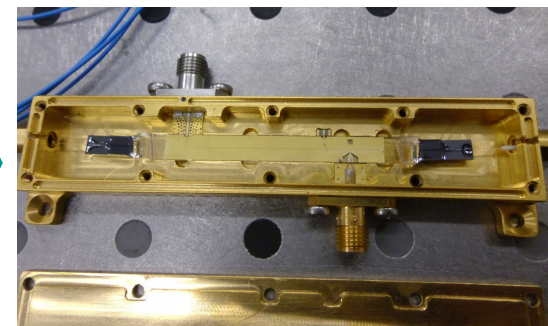
Полировка



Алмазная резка
(разделение на чипы)



Сборка в корпус



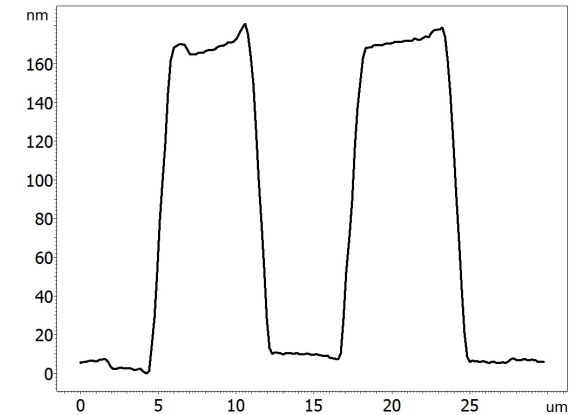
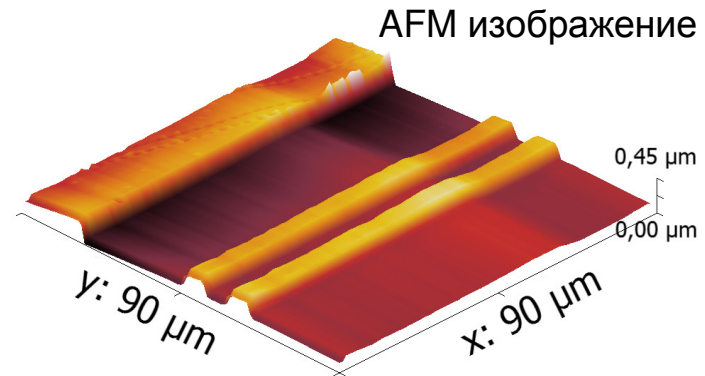
Устройство

Параметры волноводов

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

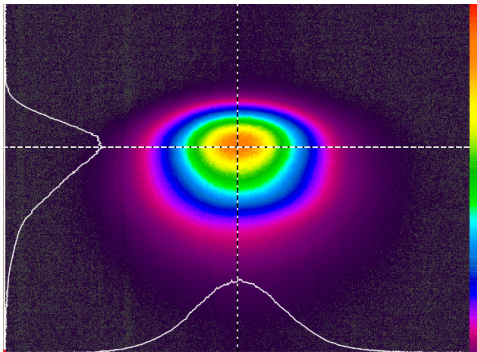
$\Delta n \sim 10^{-2} \div 10^{-4}$

**Внутренние потери
< 0.01 дБ/мм**

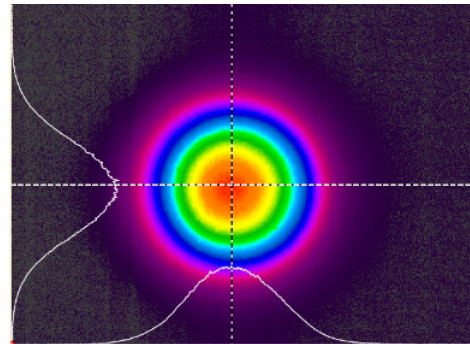


Хорошее согласование со стандартным одномодовым волокном

Ниобат лития X-срез



SMF-28

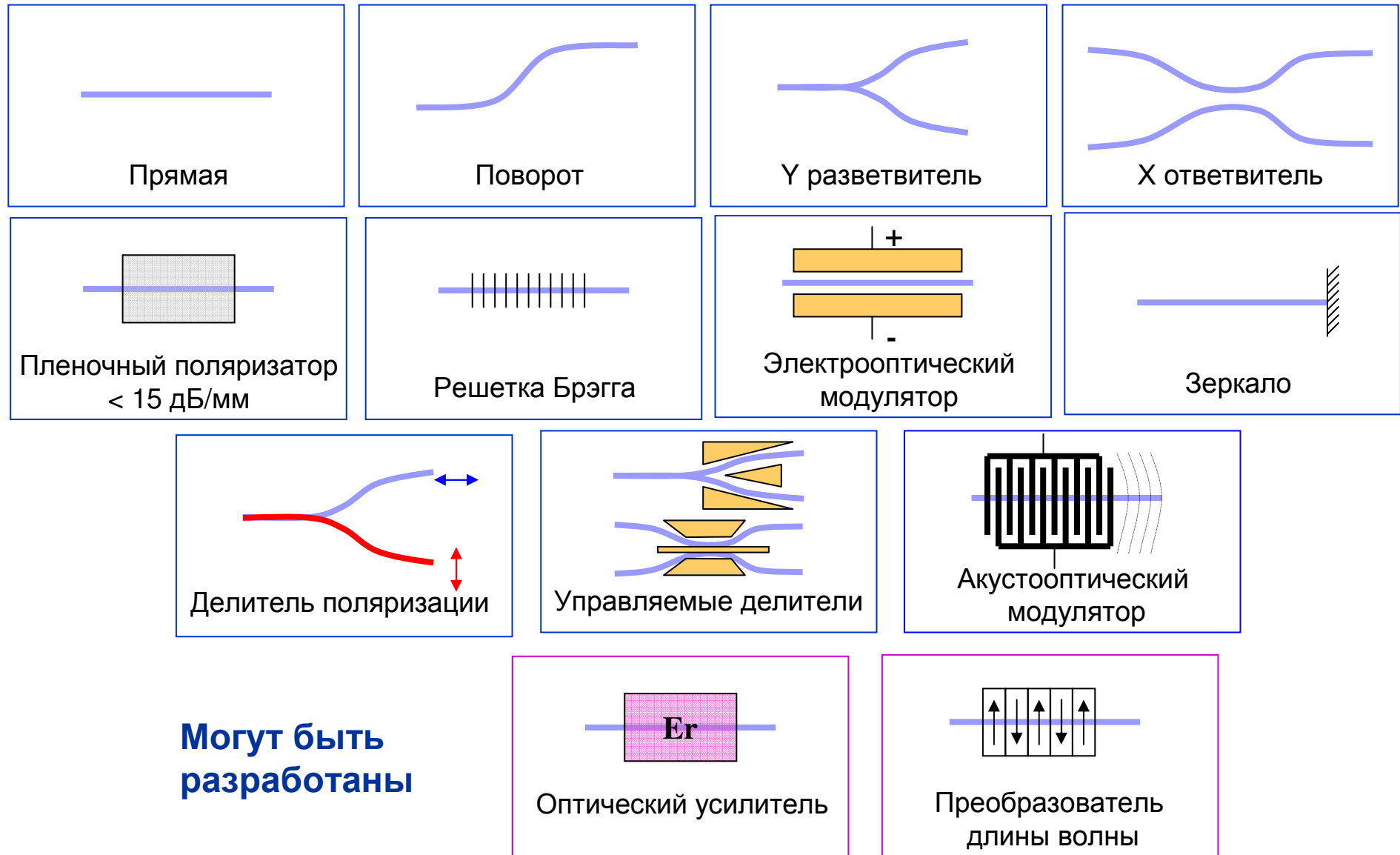


Общие оптические потери волокно-волокно

X-срез 2.2 дБ

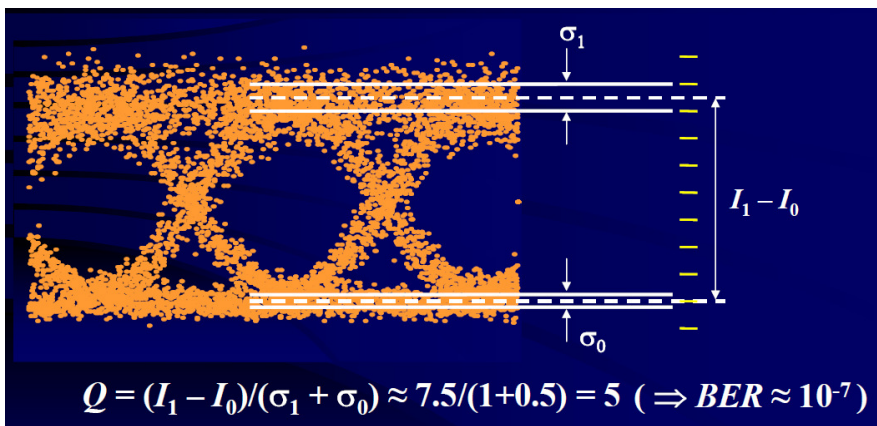
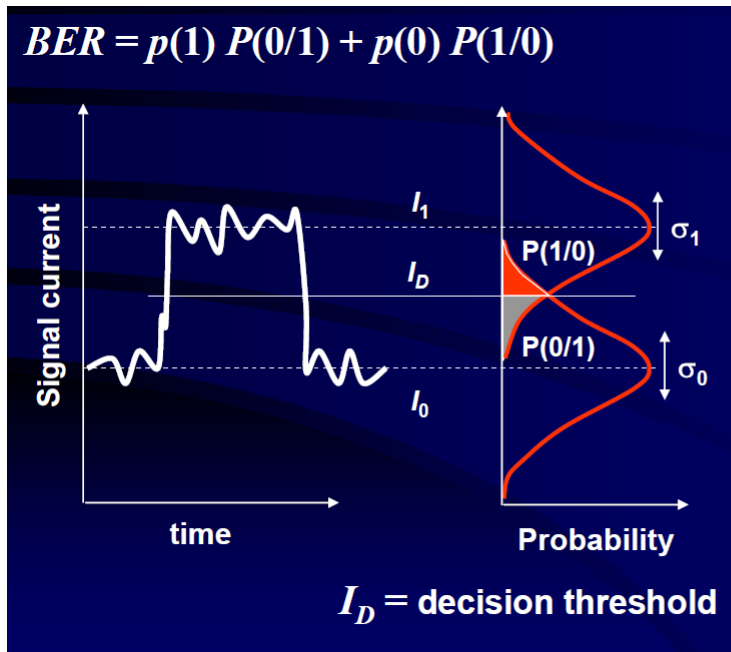
Z-срез 1.5 дБ

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

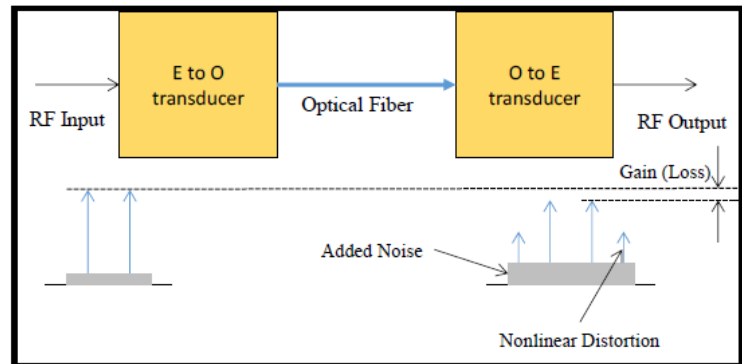


Сверхширокополосные модуляторы для радиофотоники

Телекоммуникации
(цифровые сигналы)

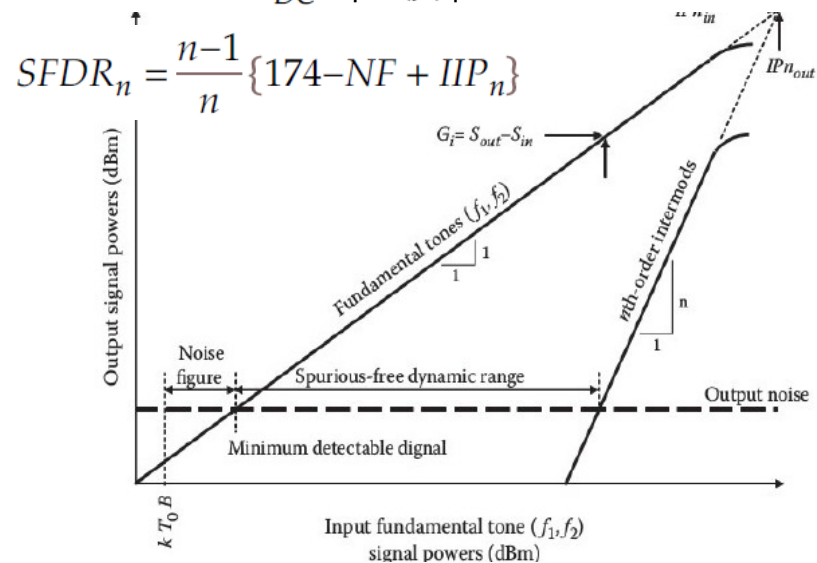


Радиофотоника
(аналоговые сигналы)



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

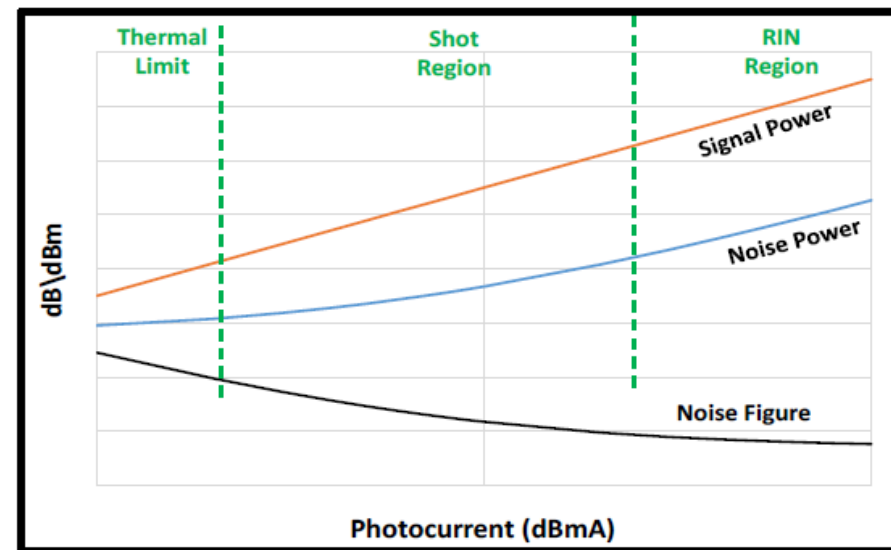
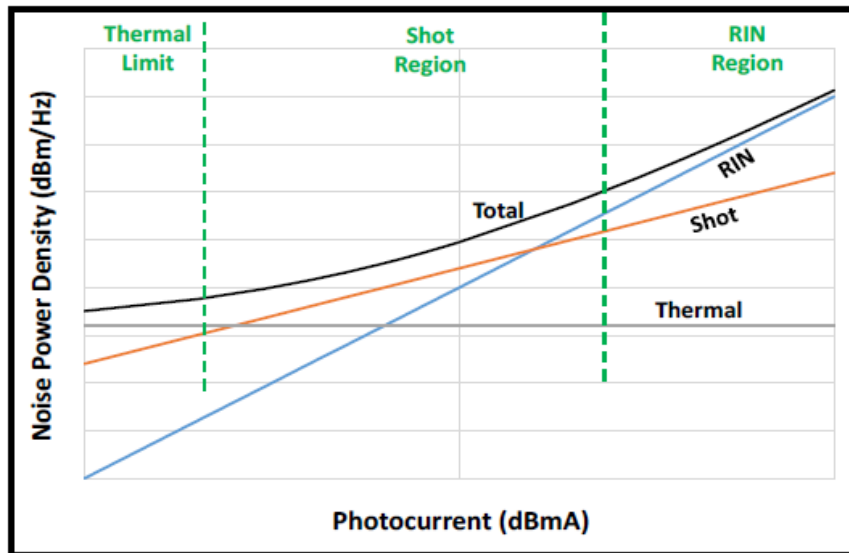
$$N_{BIX}(f) = g(f) \cdot N_{BX}(f) + k_B T + 2qI_{DC}R |H(f)|^2 + RIN \cdot I_{DC}^2 R |H(f)|^2$$



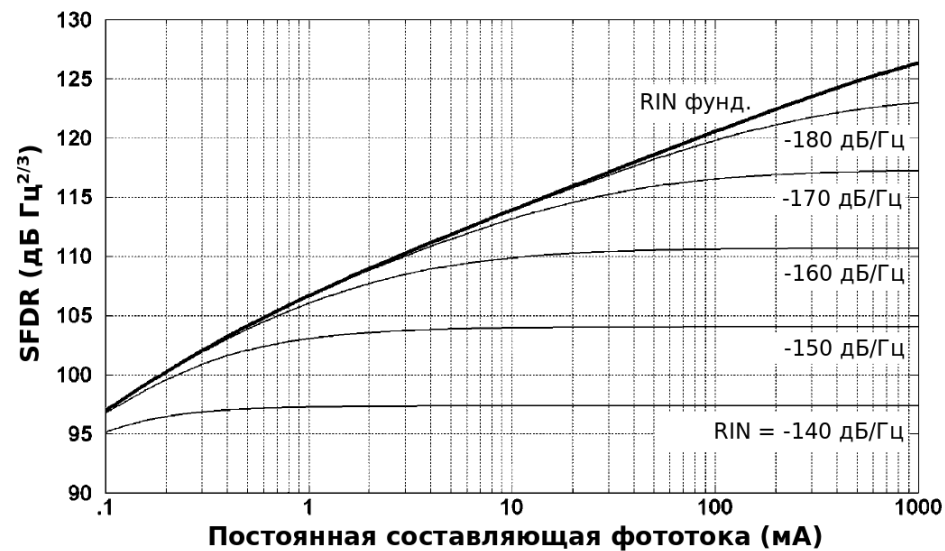
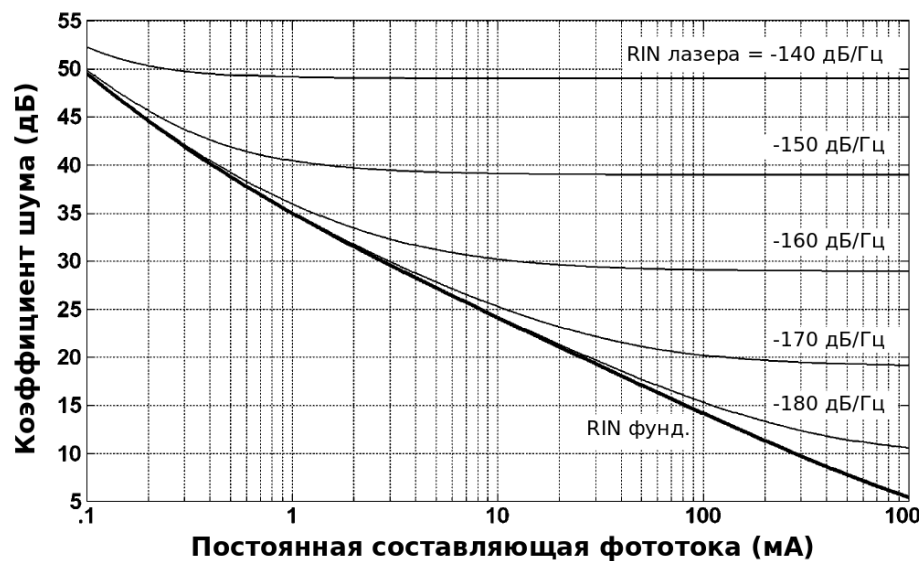
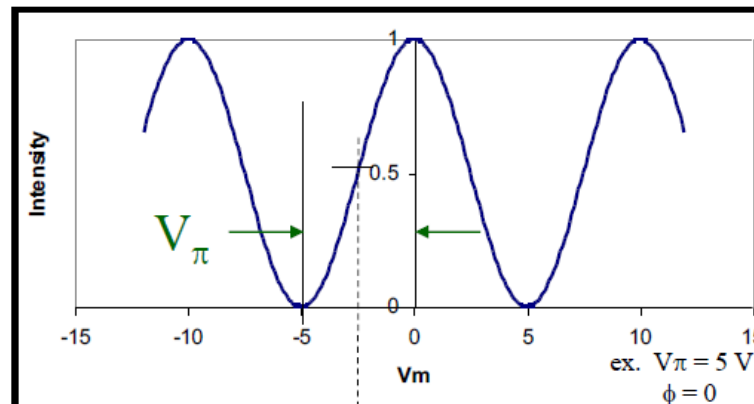
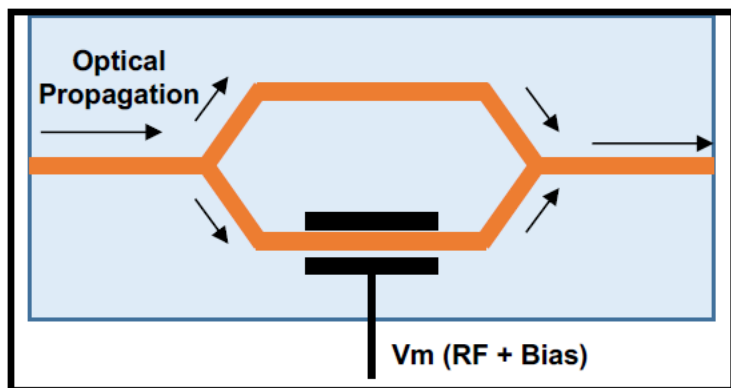
Радиофотонная линия с внешней модуляцией и прямым детектированием



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



Модулятор Маха-Цендера



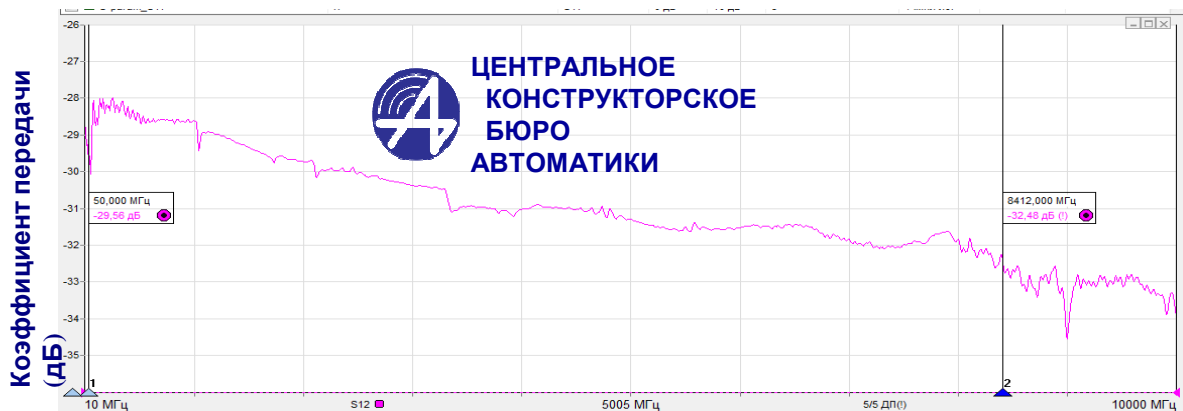
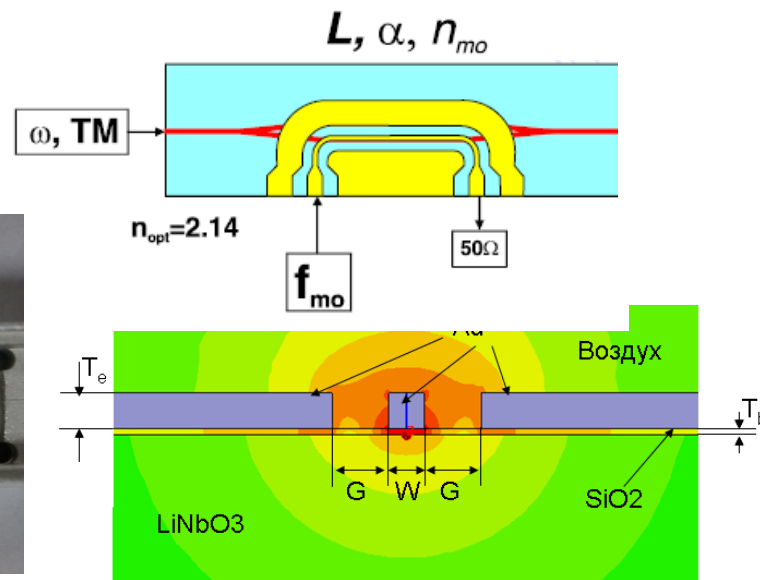
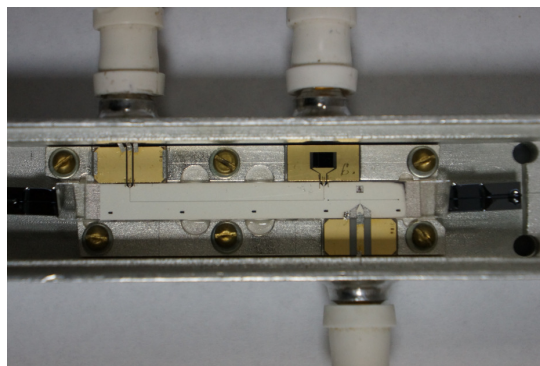
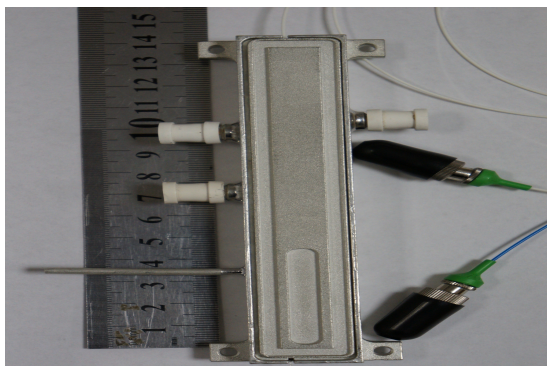
Модуляторы на основе ниобата лития позволяют использовать оптическую мощность свыше 100 мВт.

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.)



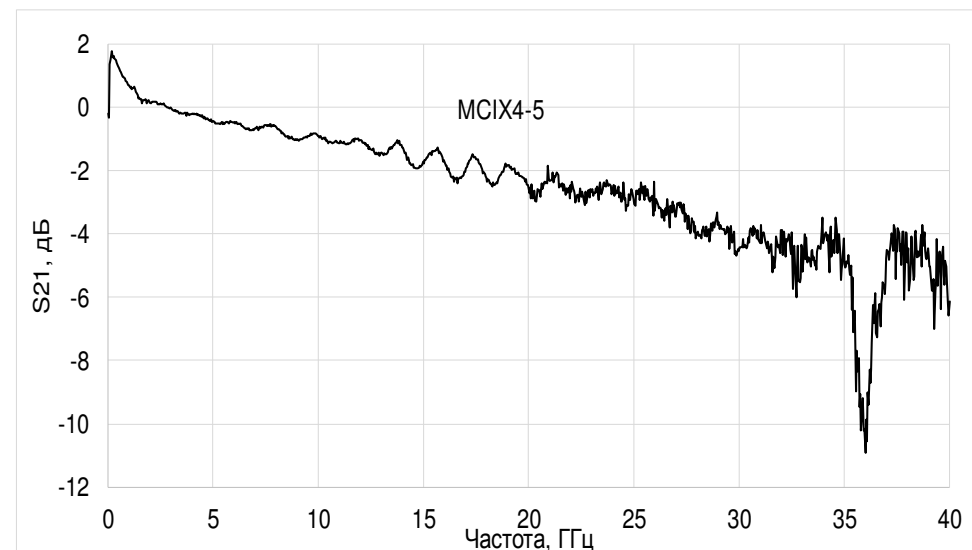
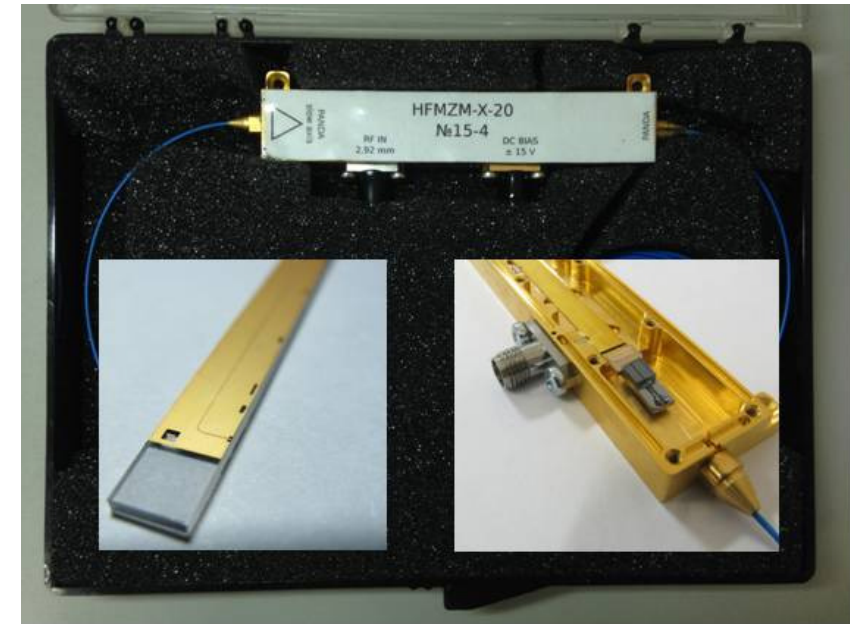
Амплитудный модулятор Маха-Цендера

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

Сверхширокополосные модуляторы для телекоммуникаций и радиофотоники

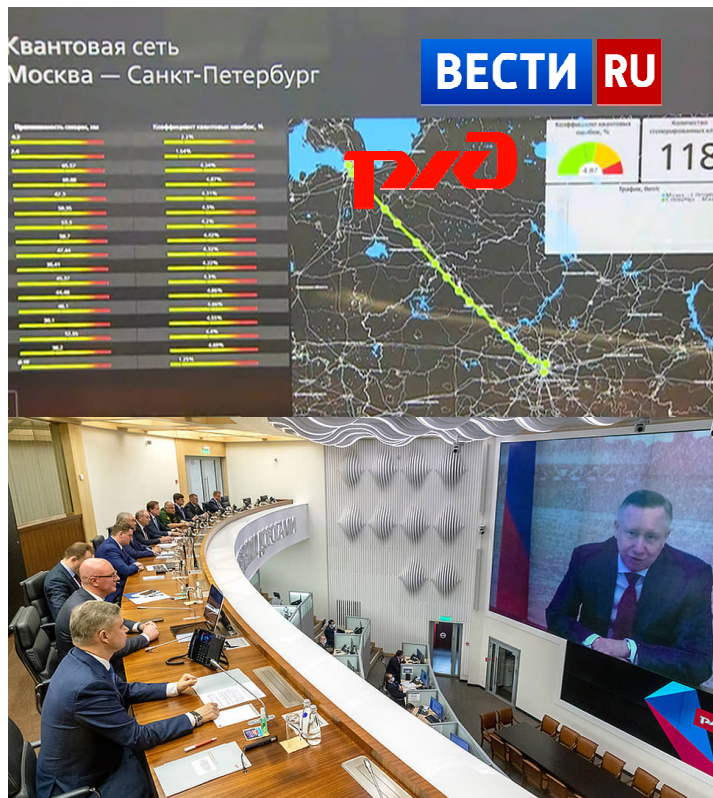
Сегодняшний уровень (2022 г.)

- 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



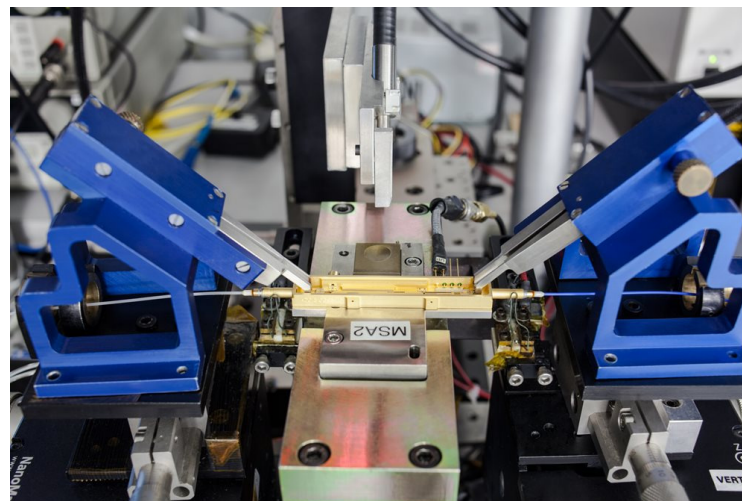
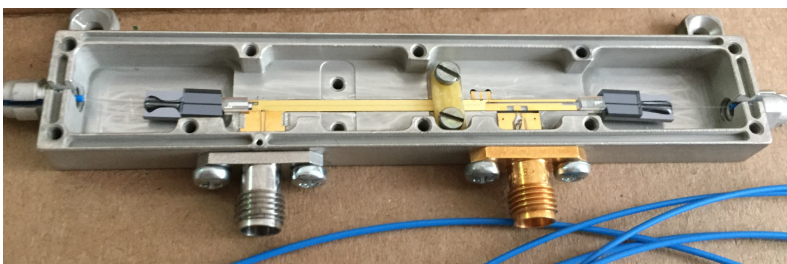
Модуляторы используются в первой российской линии квантовой связи

09 июня 2021 г.

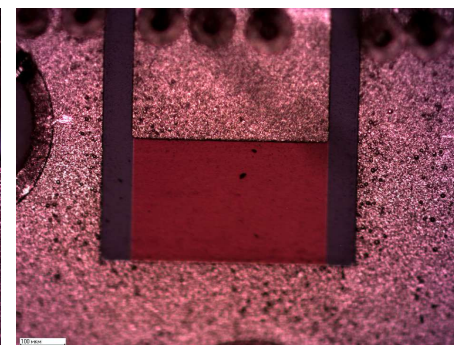
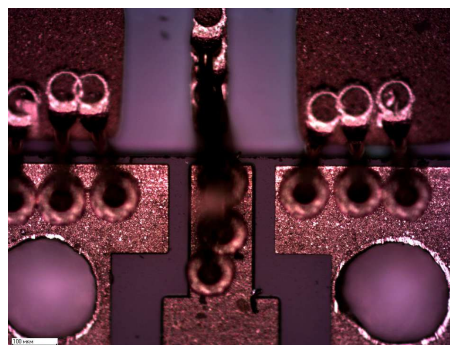
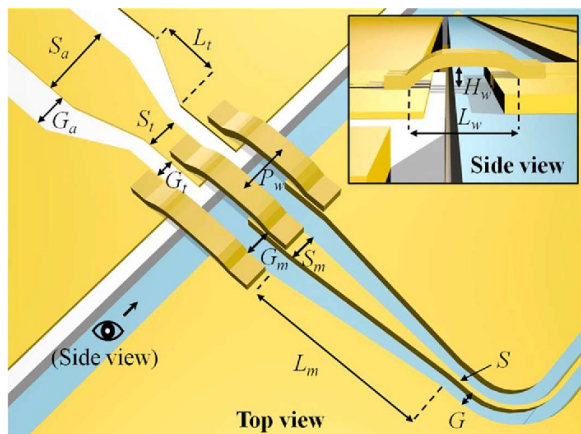


Улучшение характеристик

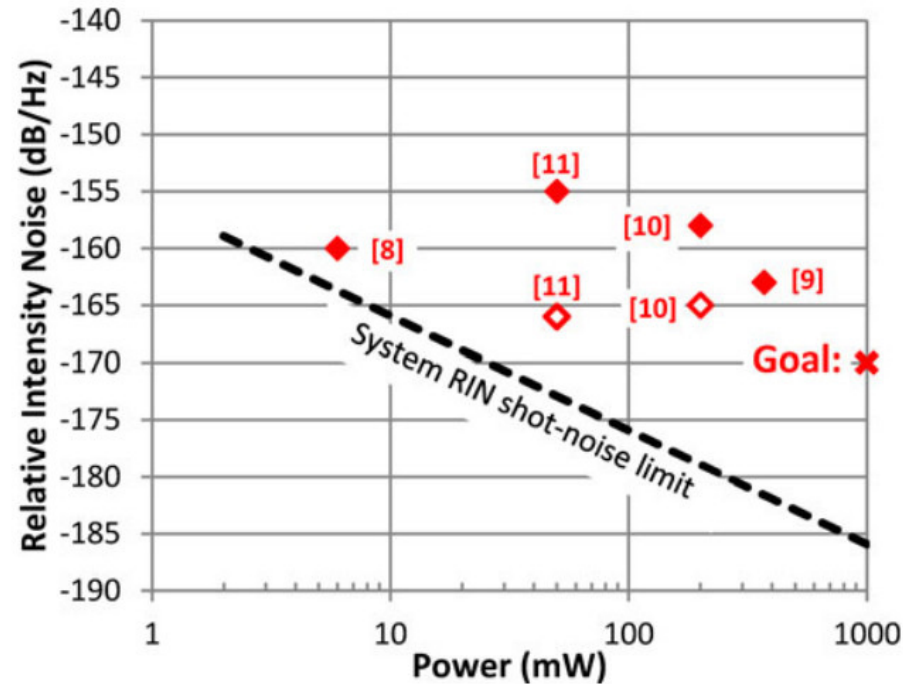
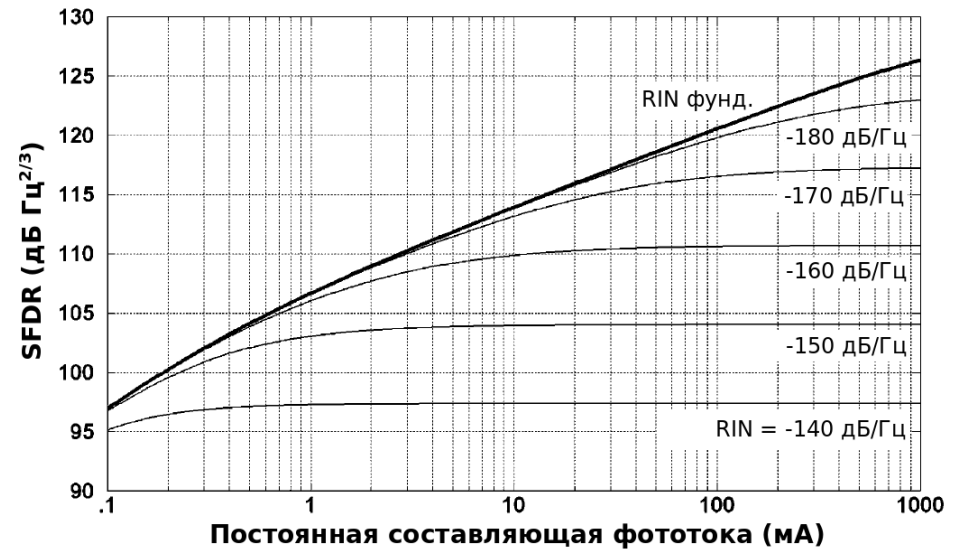
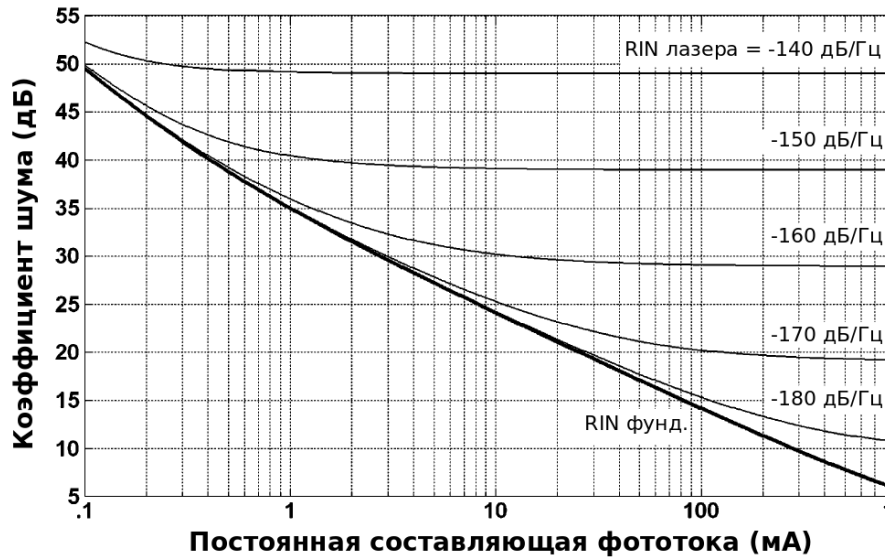
Герметичный корпус



Анализ оптимальной конфигурации переходной платы и резистора согласованной нагрузки

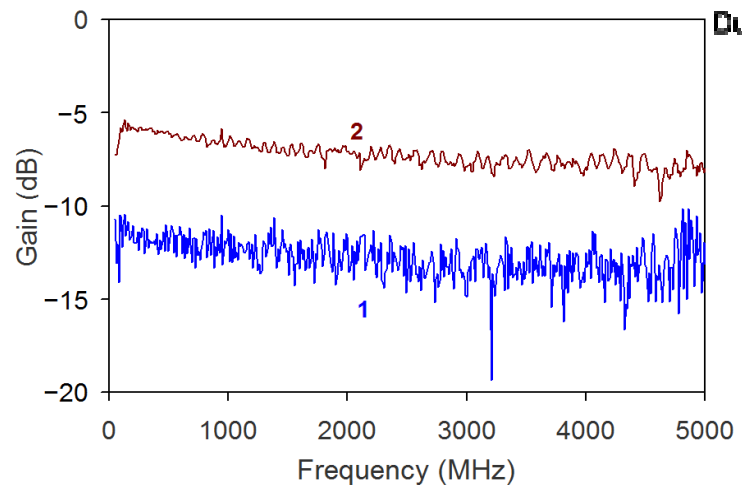
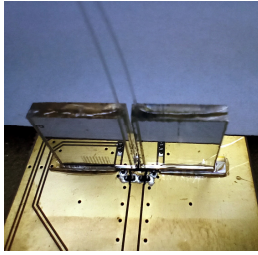
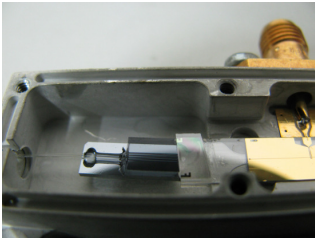
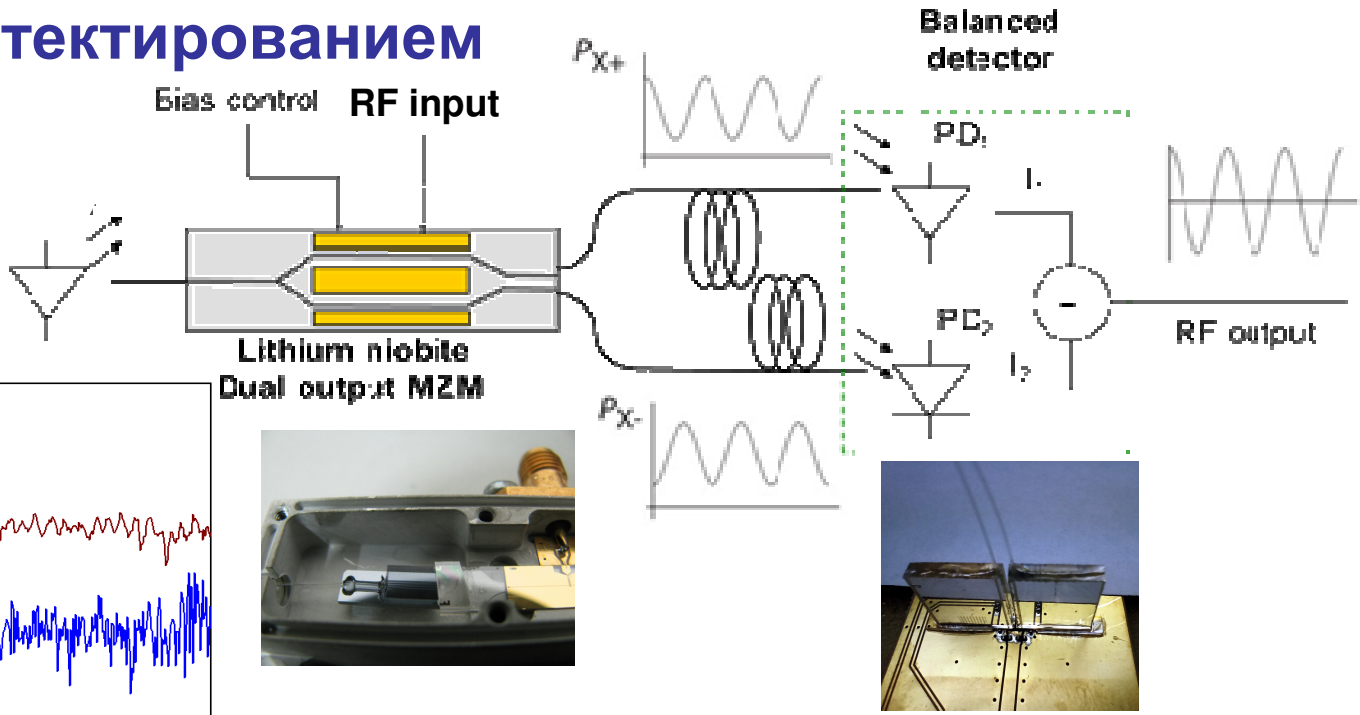


Снижение уровня шума

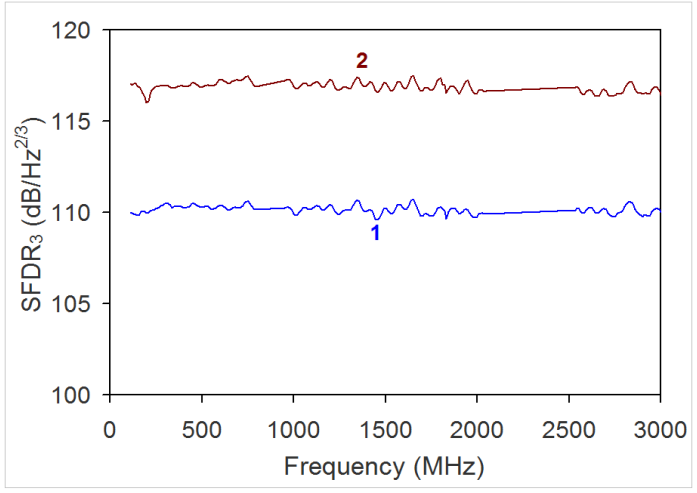
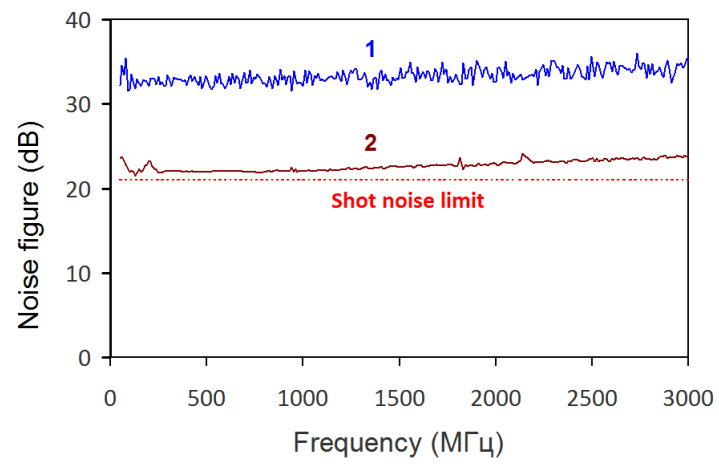


R. W. Ridgway, C. L. Dohram,
J. A. Conway, "Microwave
Photonics Programs at
DARPA", J. Lightwave
Technol., 32, pp. 3428-3439
2014.

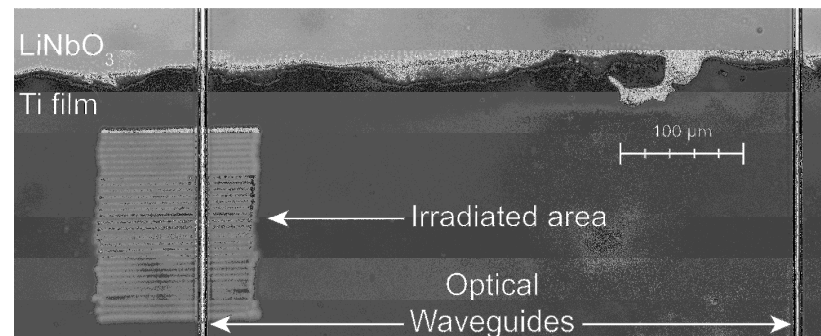
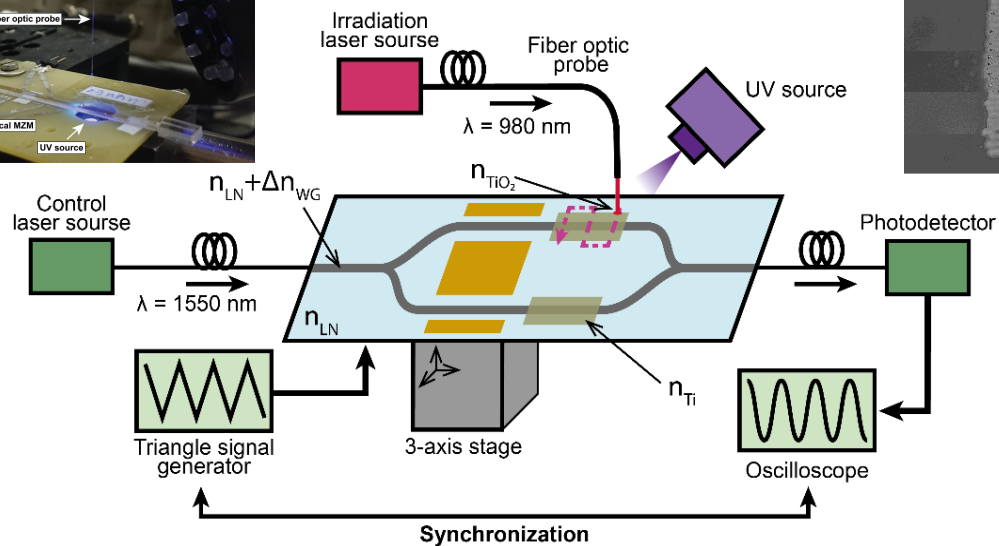
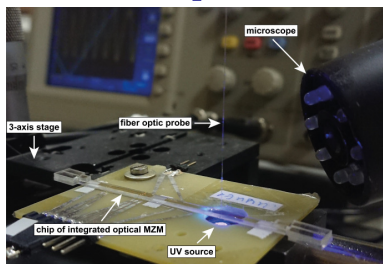
Модулятор с двойным выходом для линии с балансным детектированием



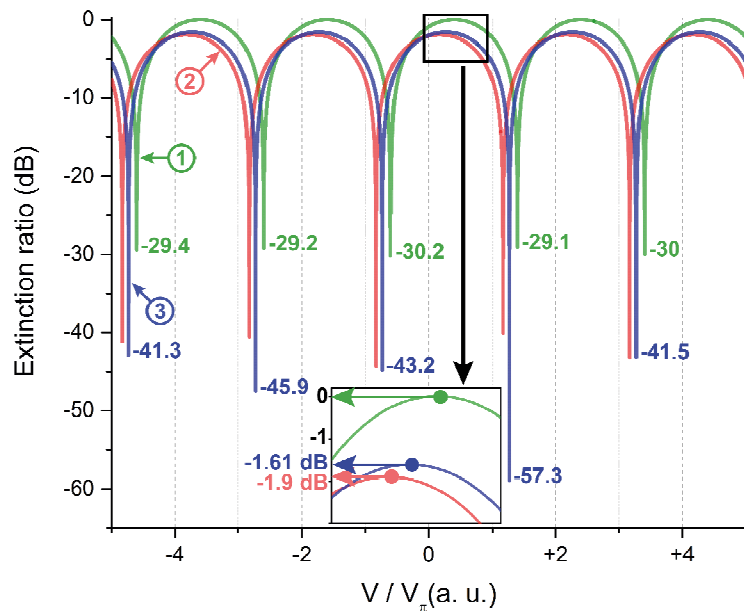
Характеристики близкие к пределу дробового шума



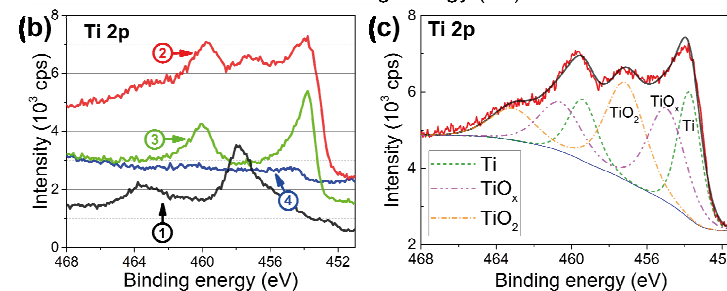
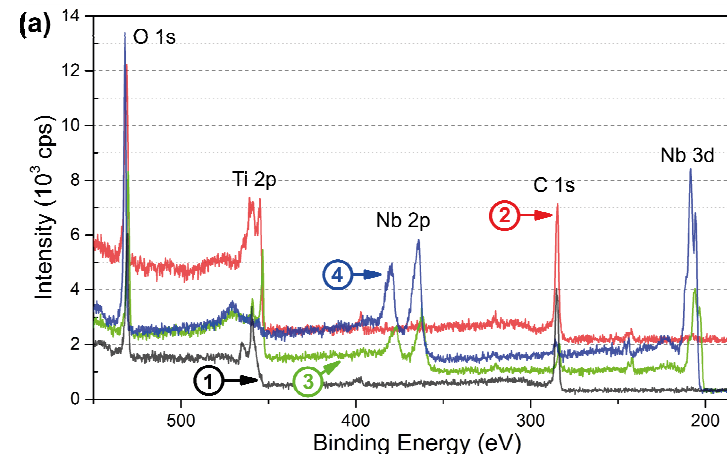
Лазерный тримминг



Enhancement of extinction ratio in the MZM



XPS spectra of irradiated 100 nm titanium film



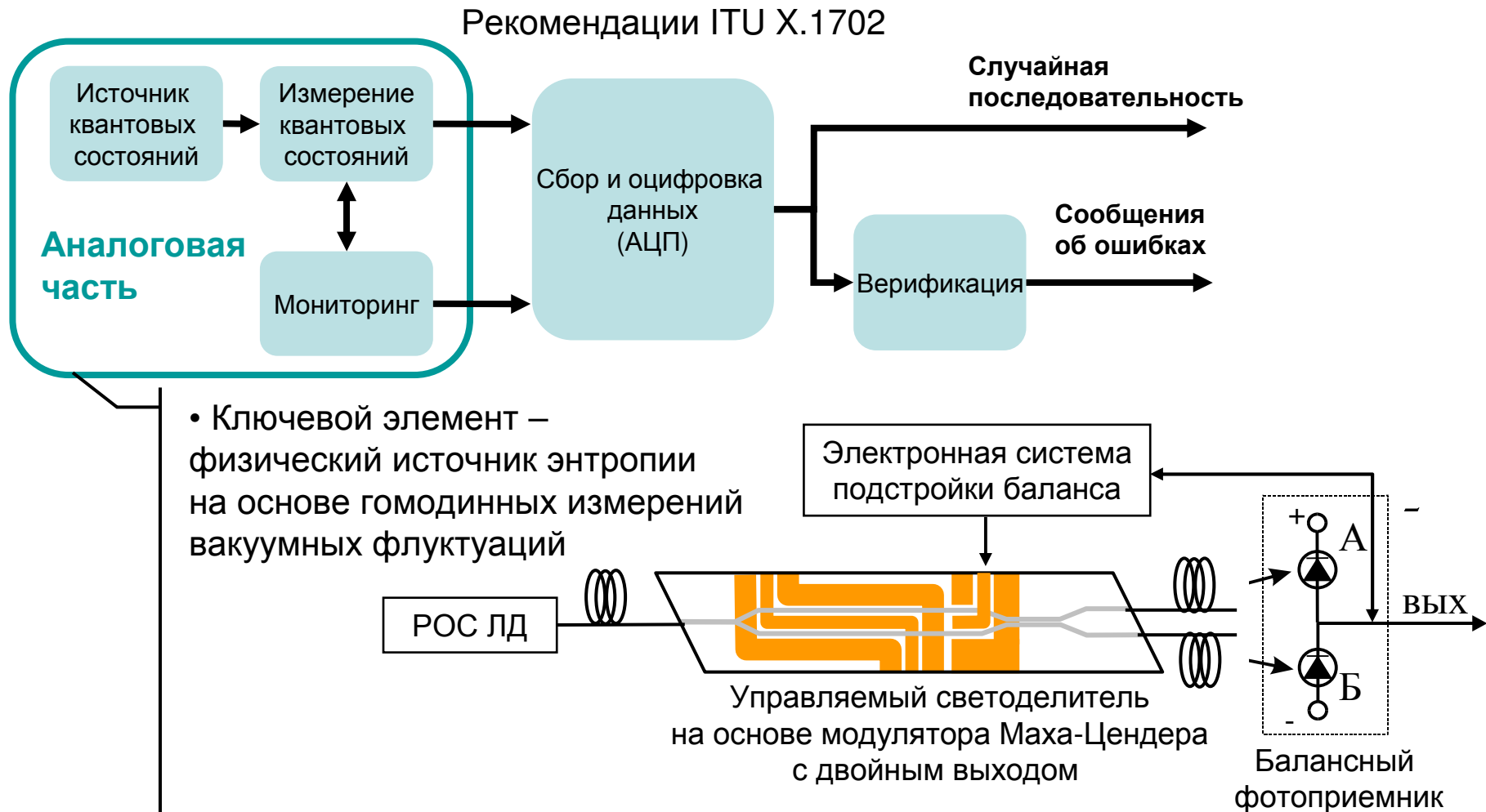
Патент РФ № 2646546 от 05.03.2018

Патент РФ № 187990 от 26.03.2019

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

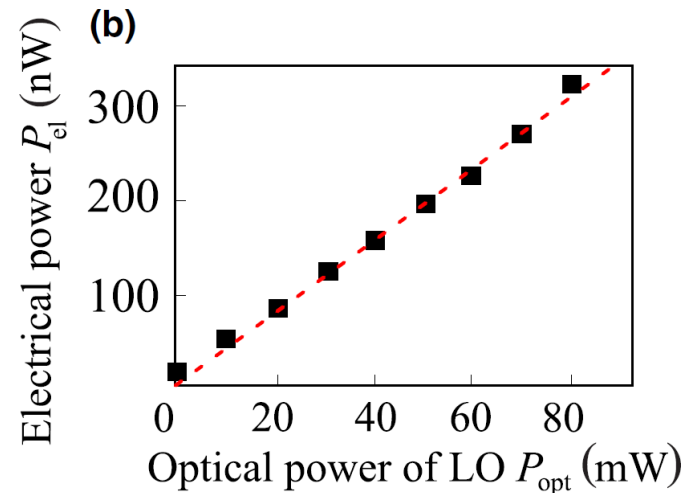
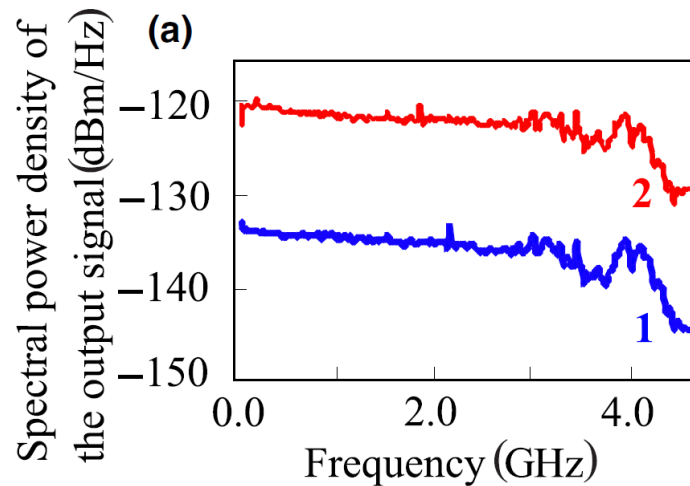
A.V.Tronev, et al, Opt. Mater. Express Vol.12, p. 4072 (2022)

Квантовый генератор случайных чисел



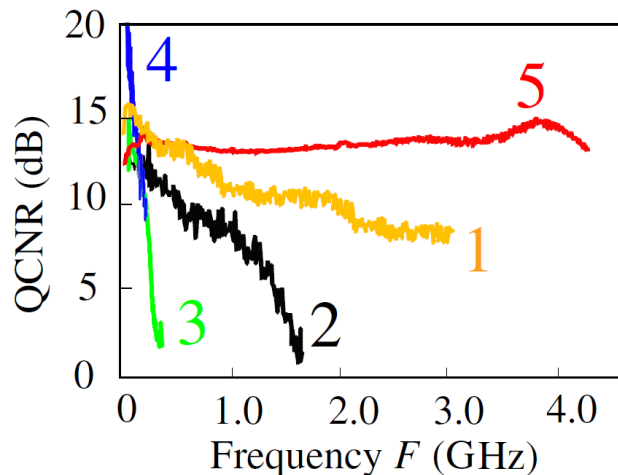
Активная стабилизация позволяет достичь точного баланса и высокой степени подавления классических шумов в широком спектральном диапазоне

Экспериментальная реализация физического источника энтропии



Санкт-Петербургский
государственный
университет

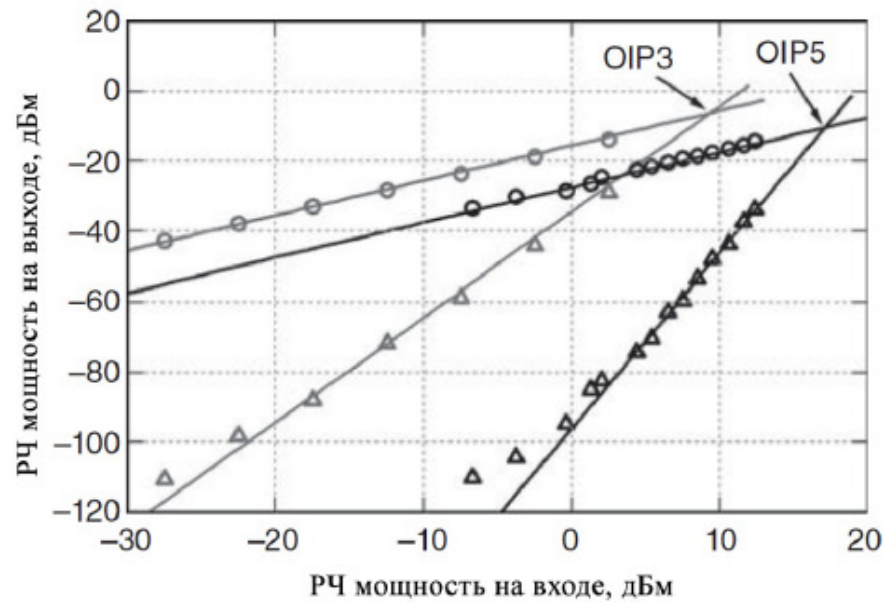
ИТМО



- 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)

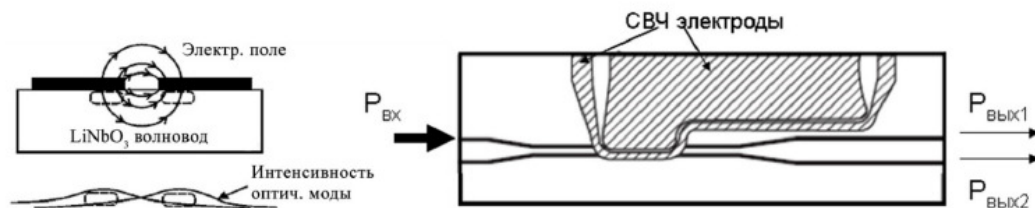
Линеаризация



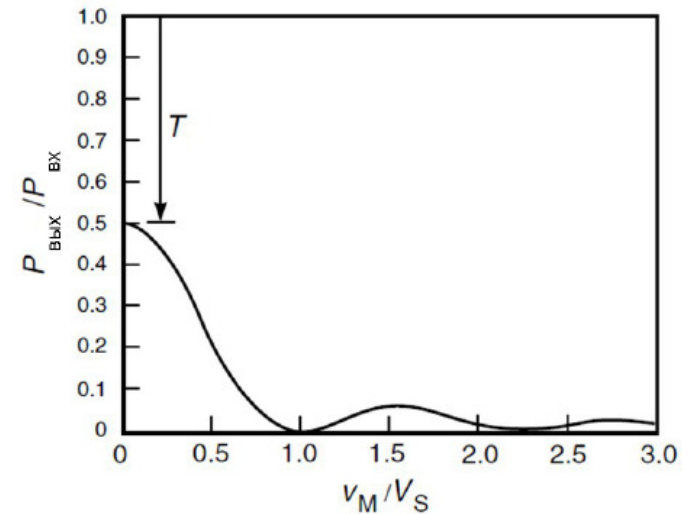
Нужен специальный модулятор



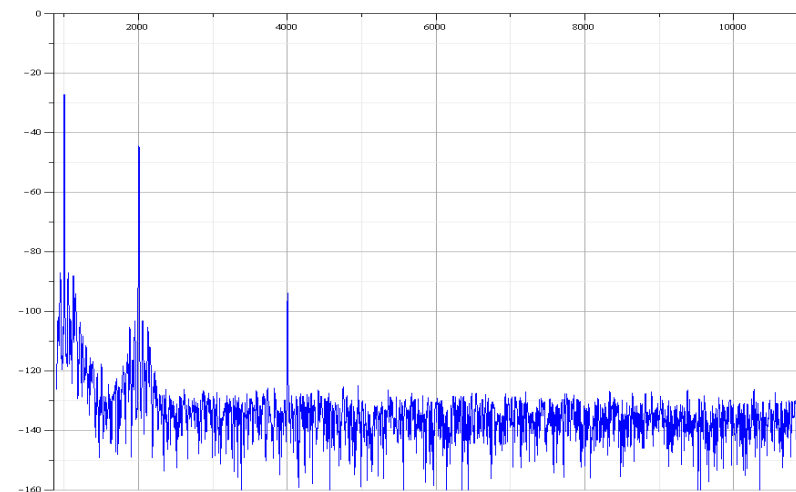
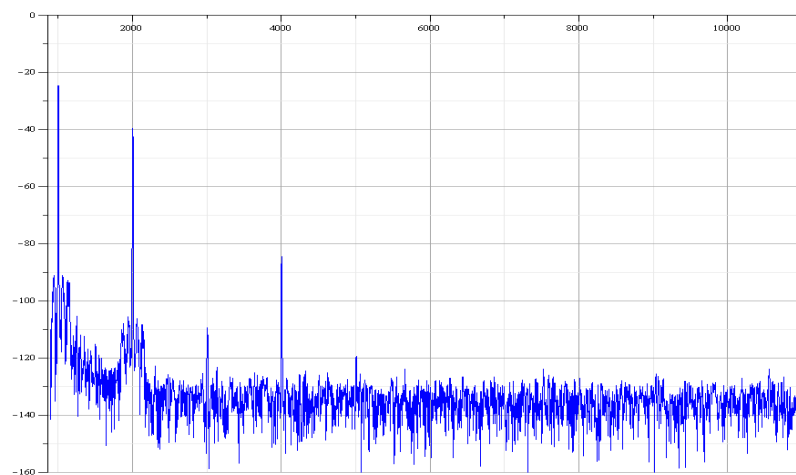
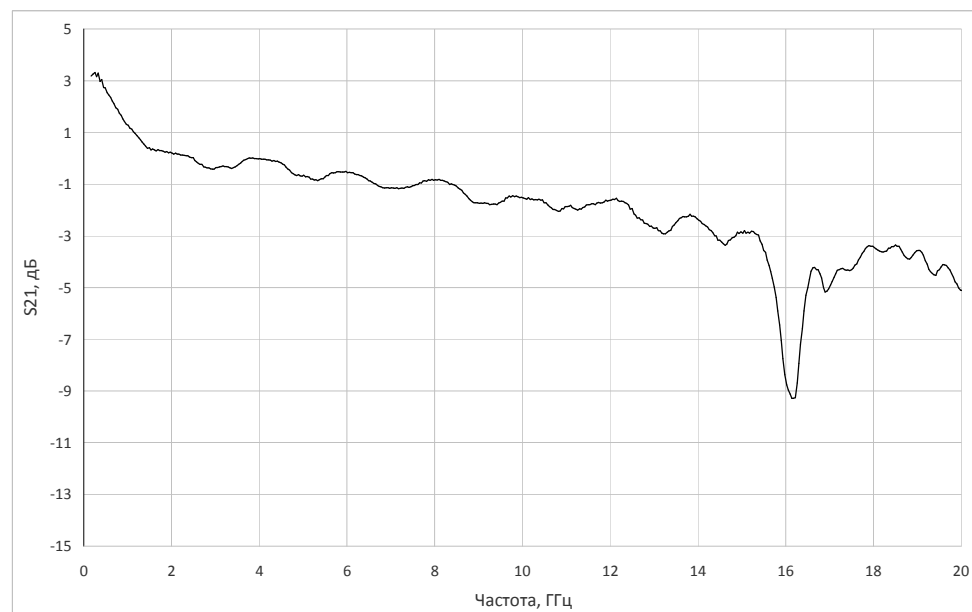
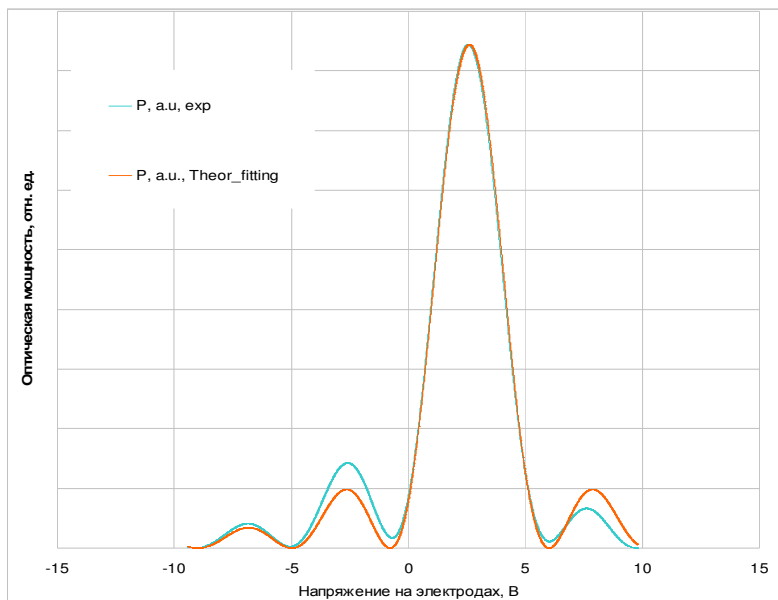
Модулятор на основе направленного X-ответвителя



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

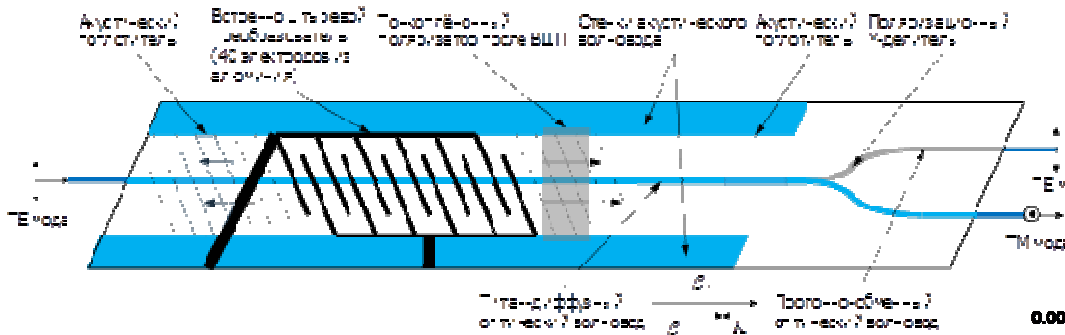
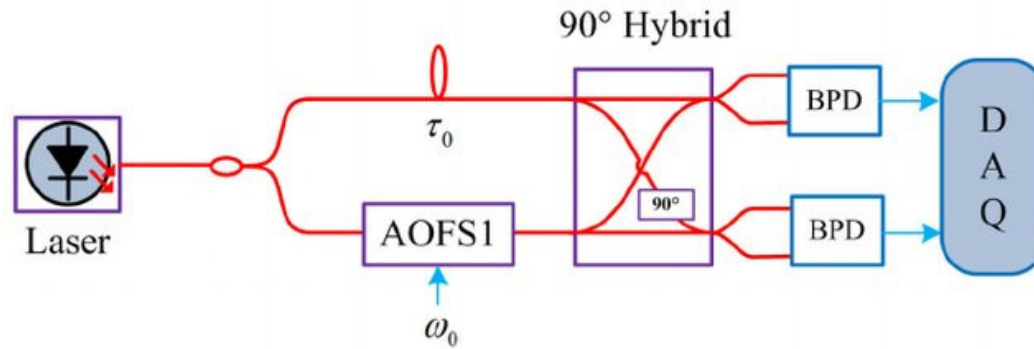


Модулятор на основе направленного X-ответвителя

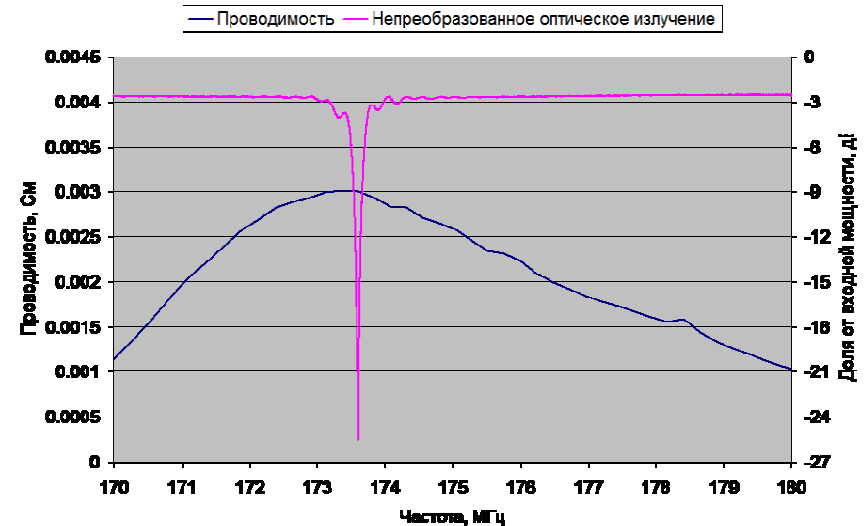


В оптимальной рабочей точке и продемонстрировано интермодуляционных членов третьего порядка.

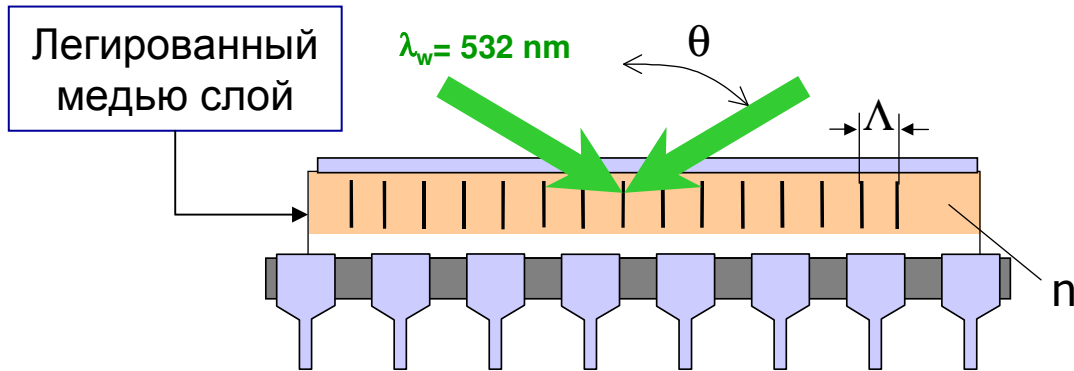
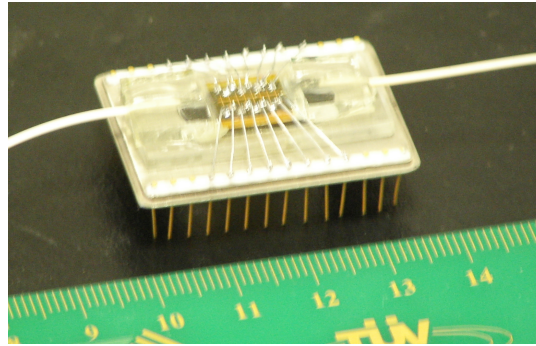
Акустооптический модулятор сдвига частоты



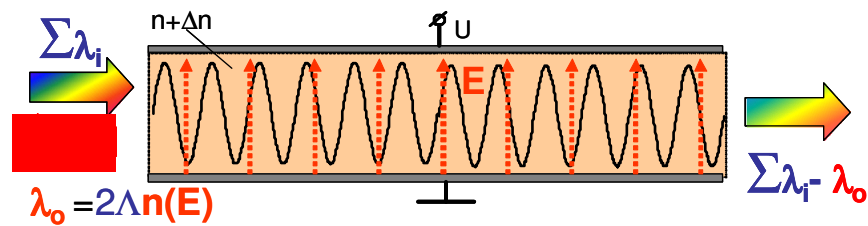
- Диапазон рабочих длин волн – 1530...1560 нм
- Частотный сдвиг – 173 МГц
- Мощность РЧ сигнала < 60 мВт
- Оптические потери < 4.5 дБ
- Перекрестные помехи < -20дБ



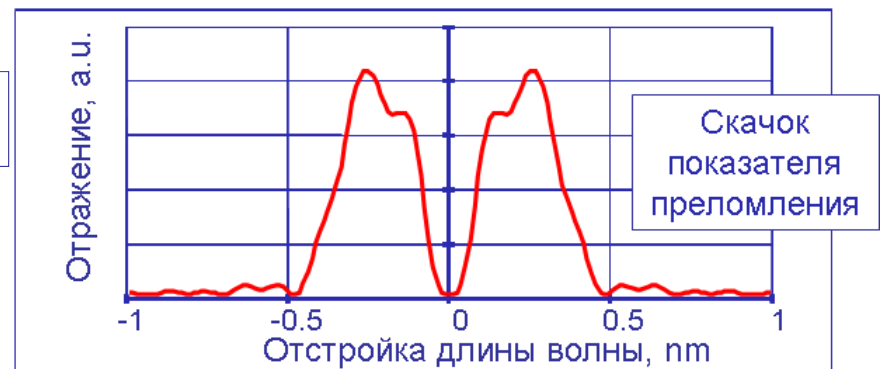
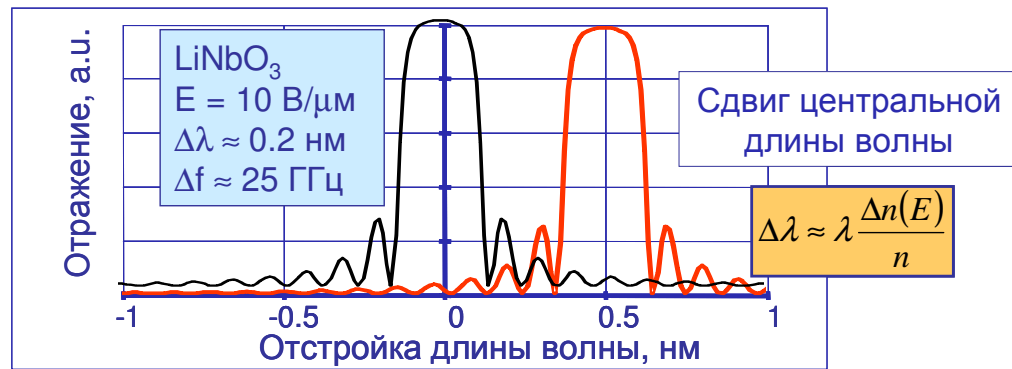
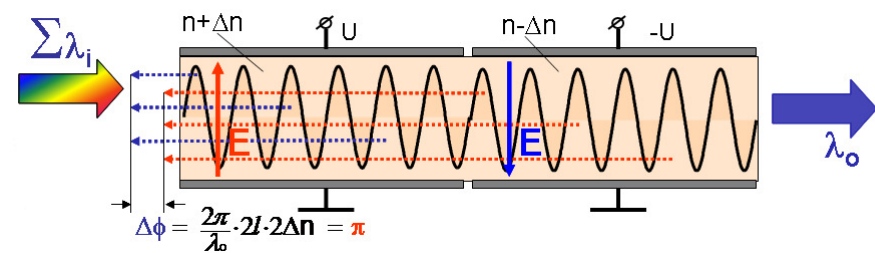
Электрооптическое управление волноводной решеткой Брэгга



Однородное электрическое поле



Неоднородное электрическое поле

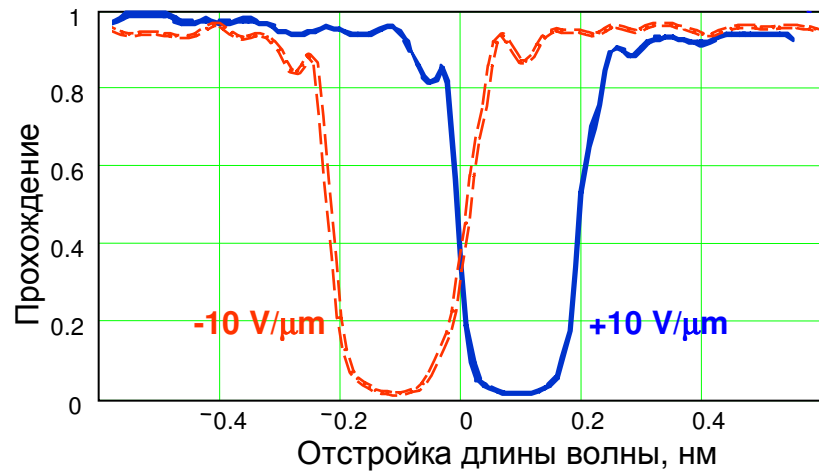


Шамрай А.В. и др. // Квантовая электроника— 2005 - т. 35 – С.734-740.

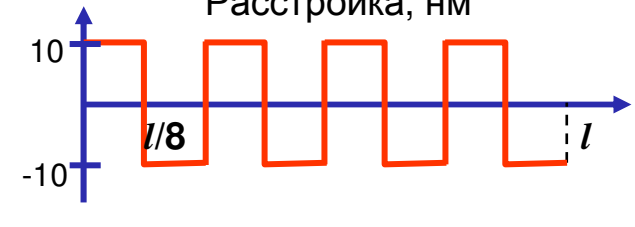
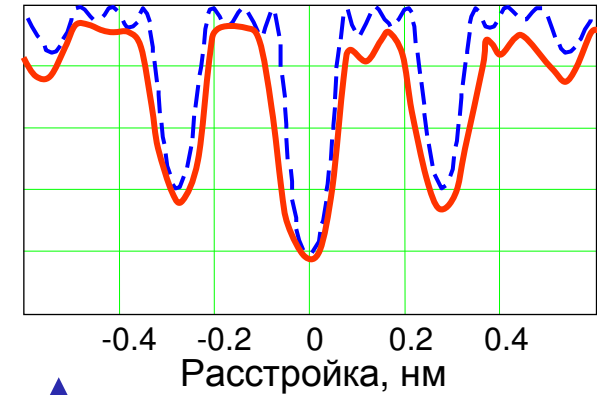
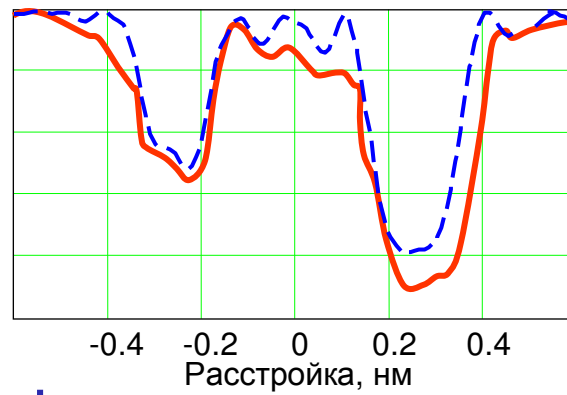
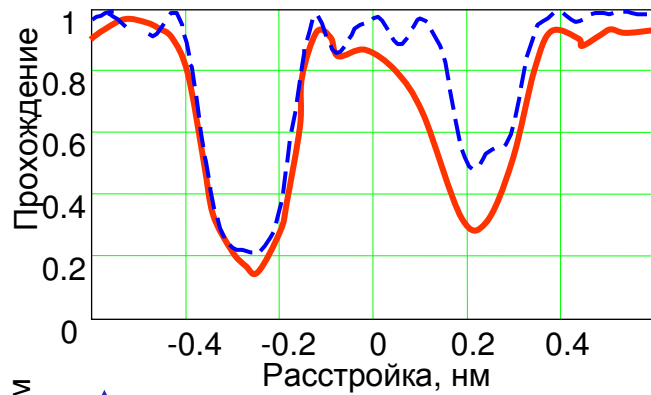
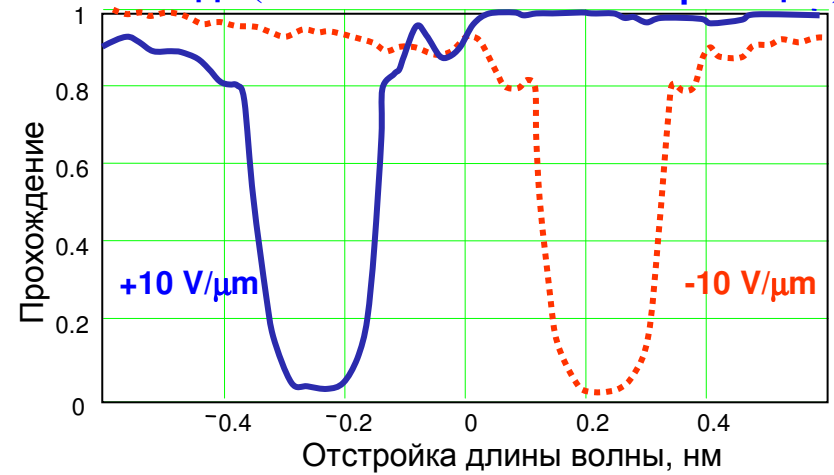
Петров М.П. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – т.30,– С.75-81.

Электрооптическое управление волноводной решеткой Брэгга

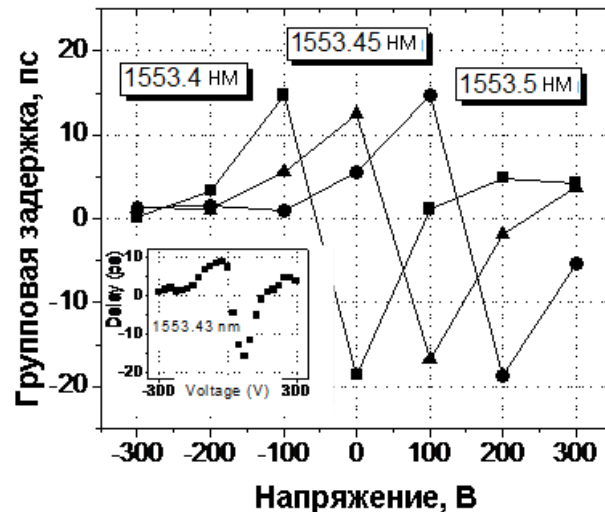
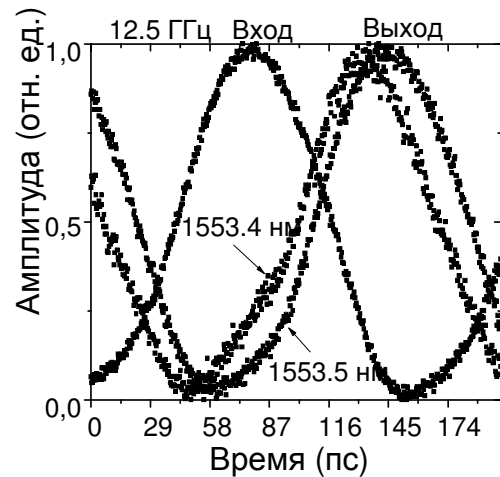
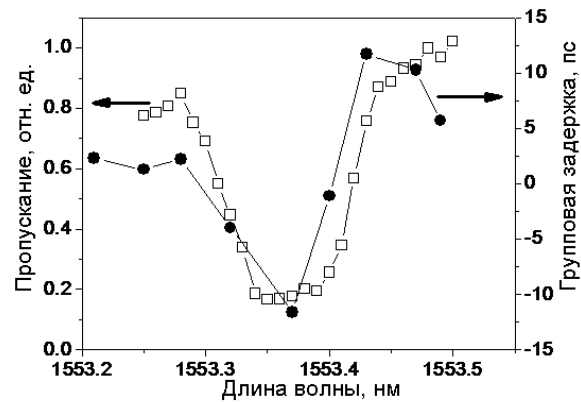
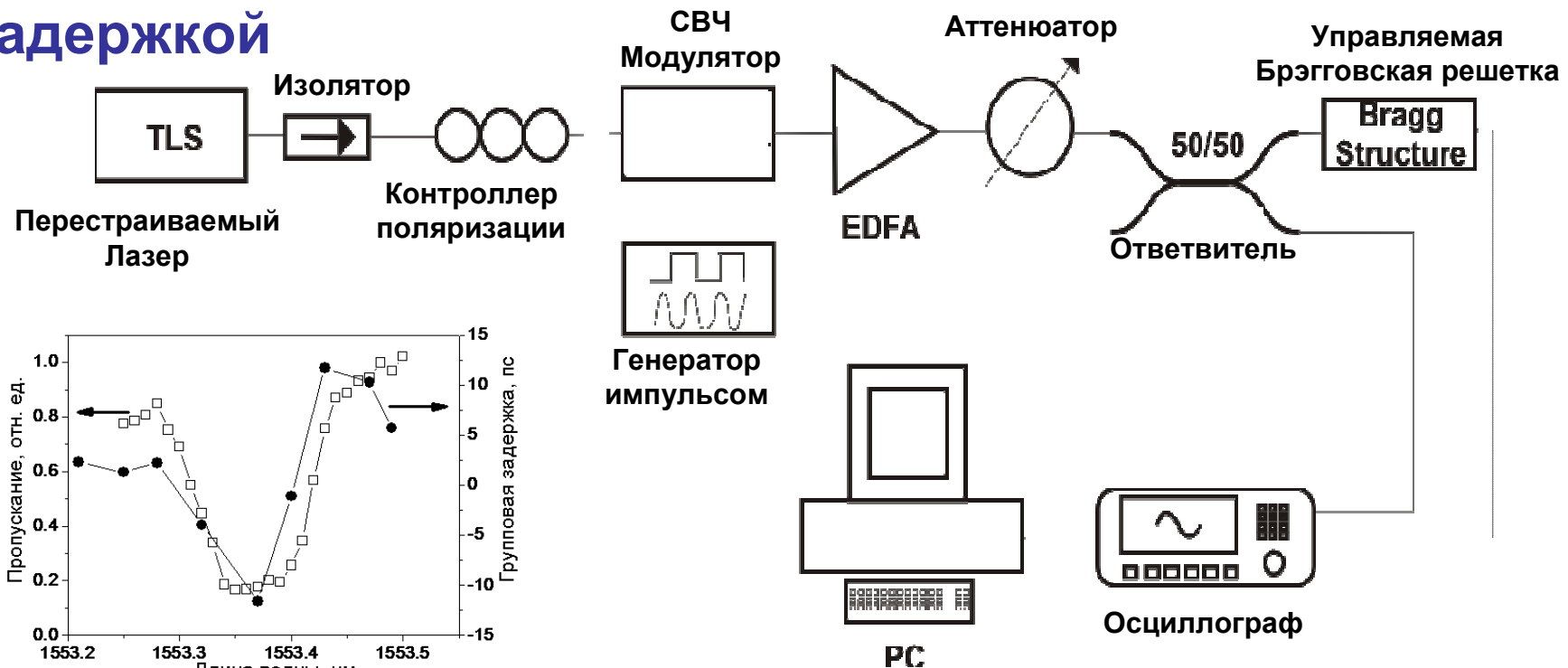
TM – мода (обыкновенная поляризация)



TE – мода (необыкновенная поляризация)

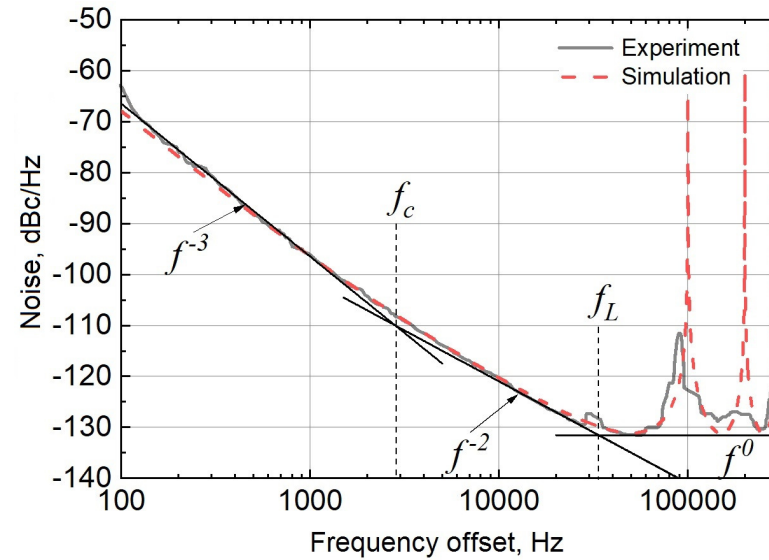
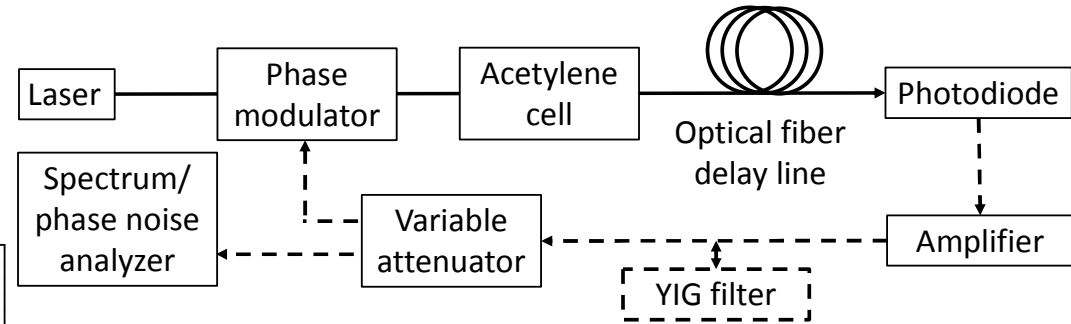
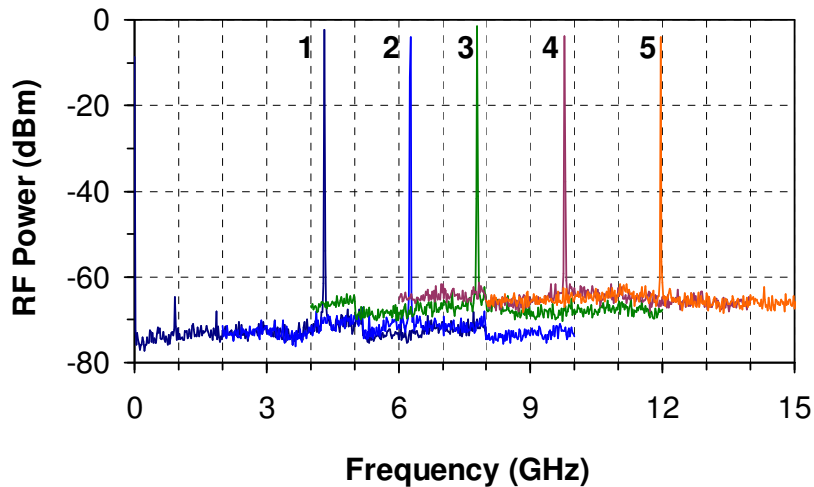
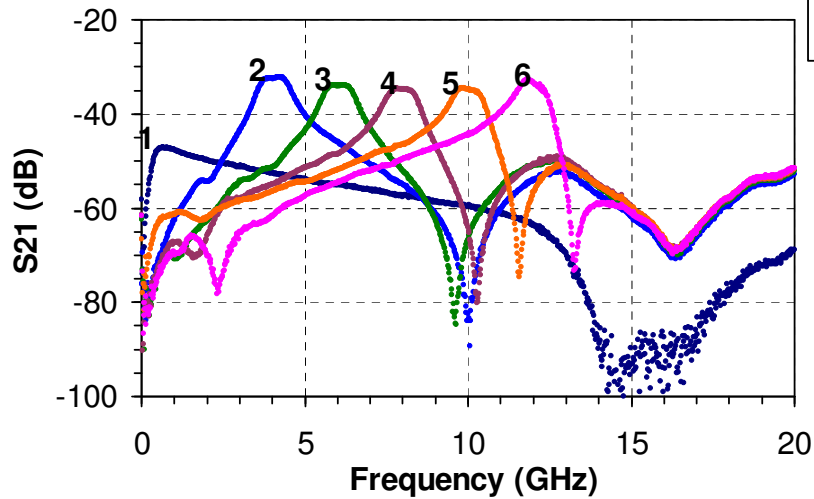


Электрооптическое управление групповой задержкой



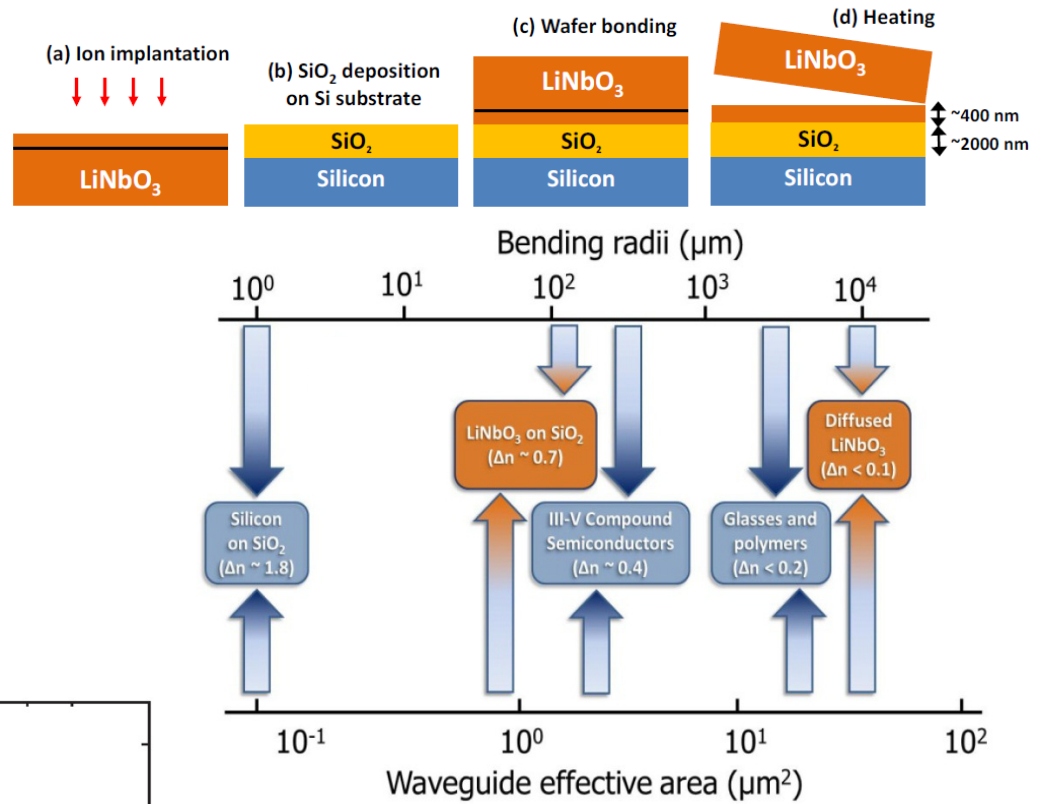
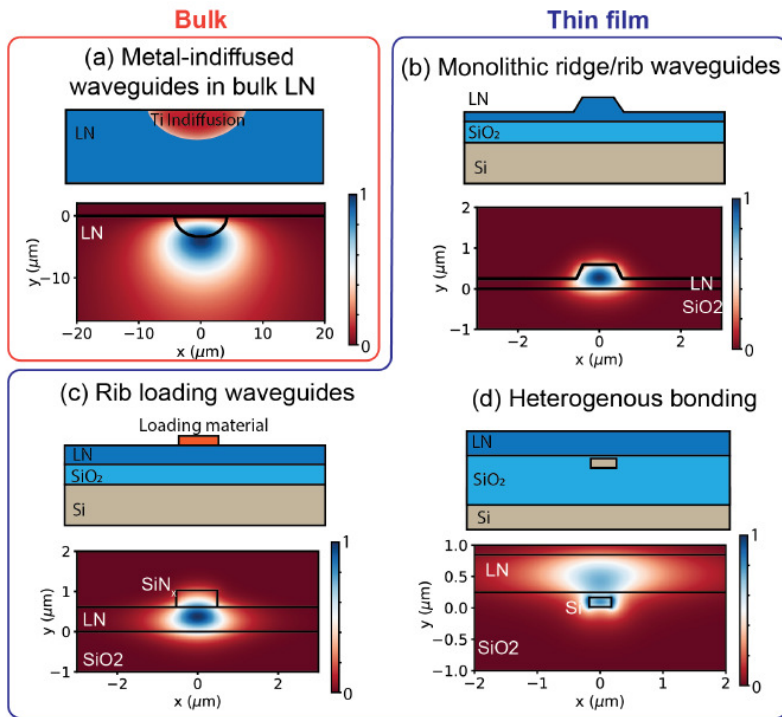
Диапазон изменения времени опережения/задержки составлял 40 пс или 0.5 τ.

Фазовый модулятор в составе перестраиваемого оптоэлектронного СВЧ генератора

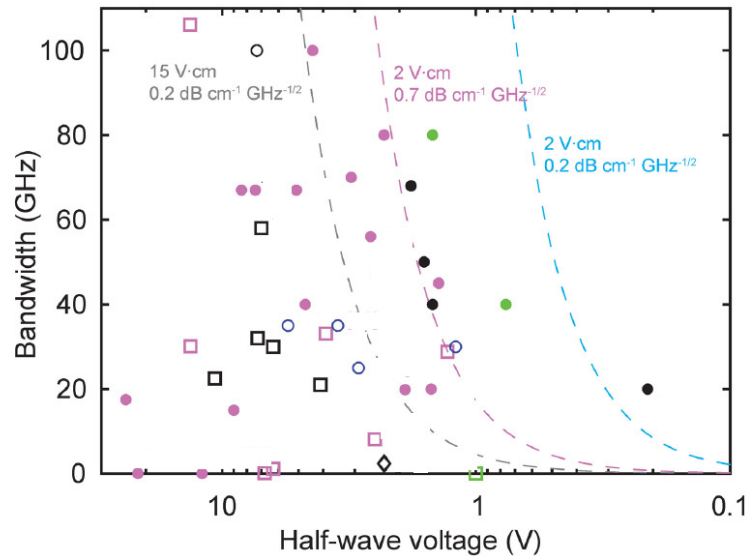


V. Lebedev, et al, Photonics. 2023; 10(2):196.
<https://doi.org/10.3390/photonics10020196>

Тонкопленочный ниобат лития



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

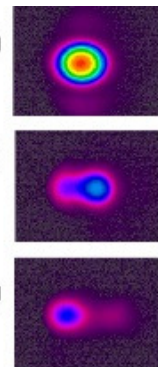
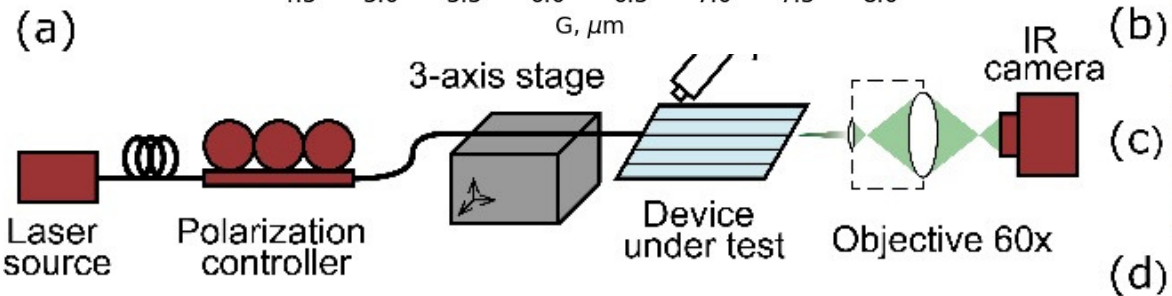
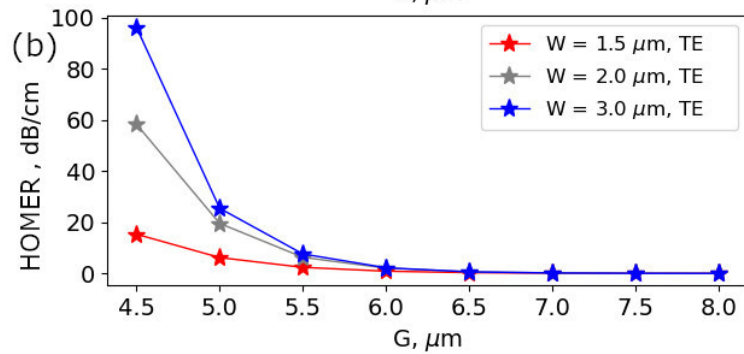
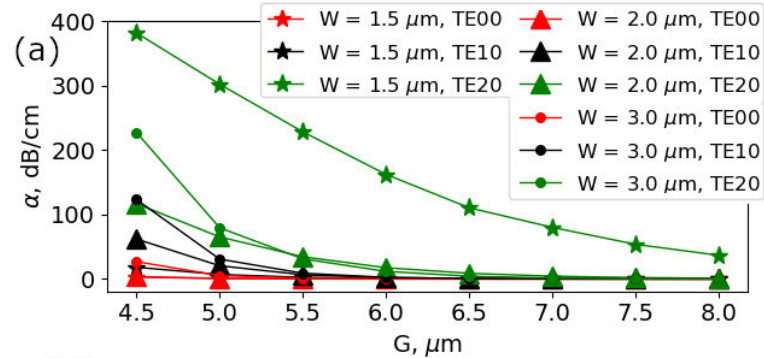
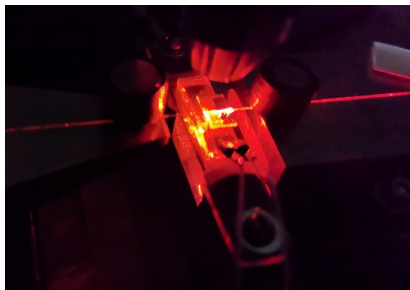
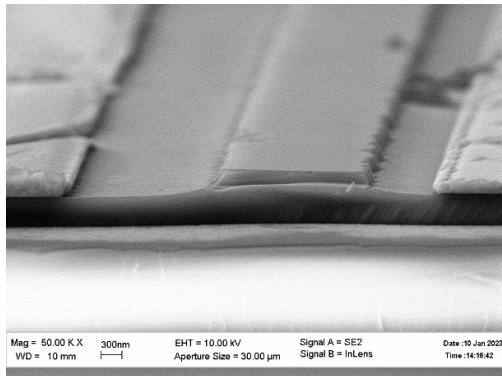
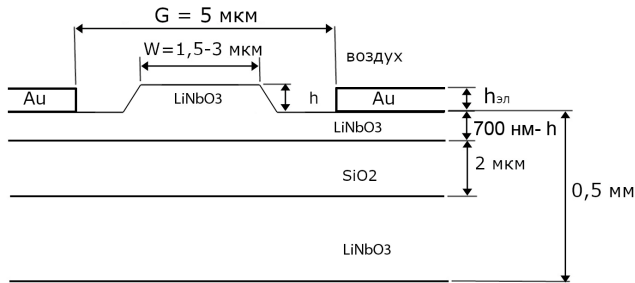


- Di Zhu, et al, Adv. Opt. Photon. 13, 242-352 (2021).
- Mian Zhang et al, Optica 8, 652-667 (2021).
- Y. Jia et al, Appl. Phys. Rev., vol. 8 no.1, 011307, (2021).

Тонкопленочный ниобат лития

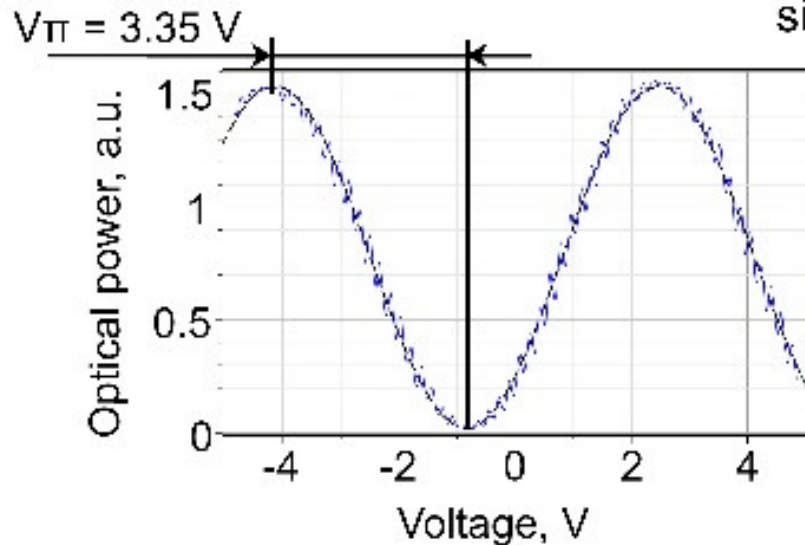
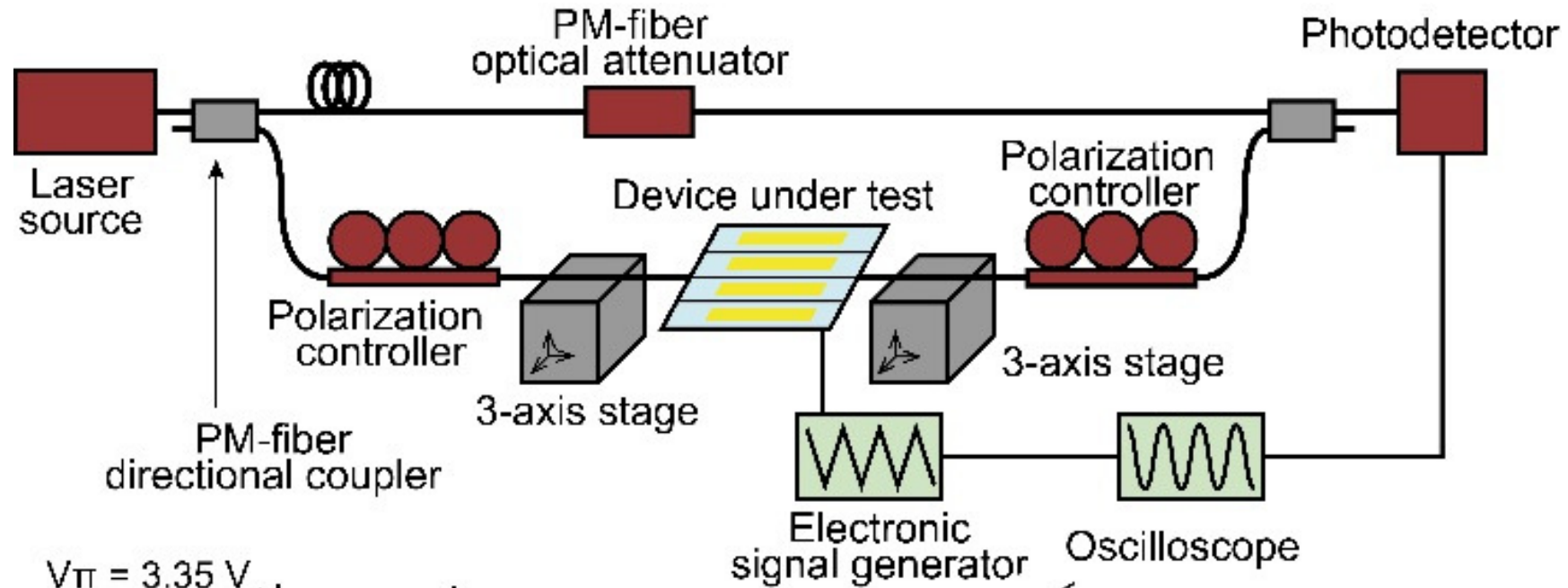
Фазовые модуляторы на тонкопленочном ниобате лития изготовленные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе с использованием контактной фотолитографии

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 (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 милливольт 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