

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

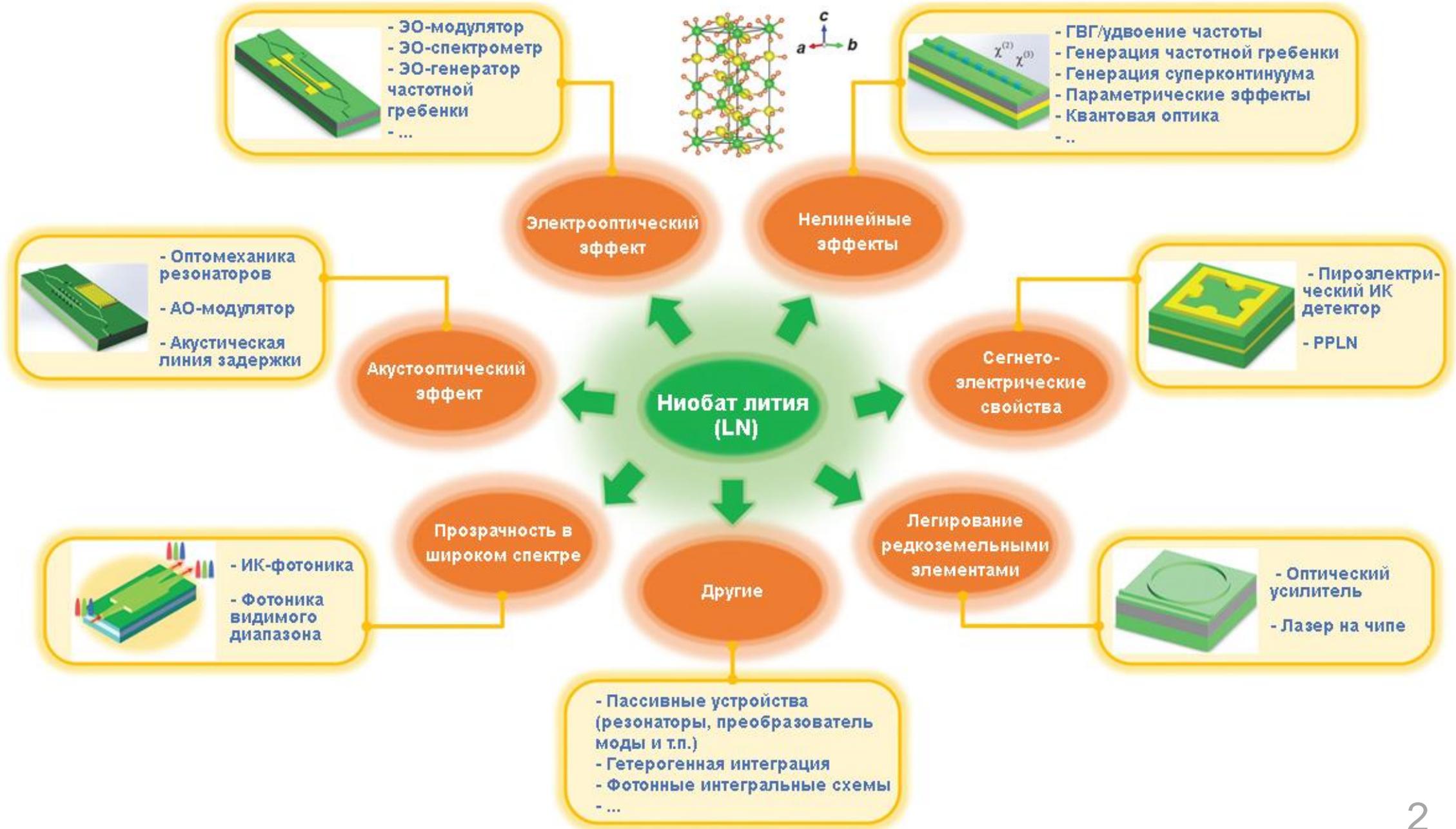
Российской академии наук

# **Сверхширокополосные интегрально-оптические модуляторы на основе ниобата лития: современное состояние и перспективы развития**

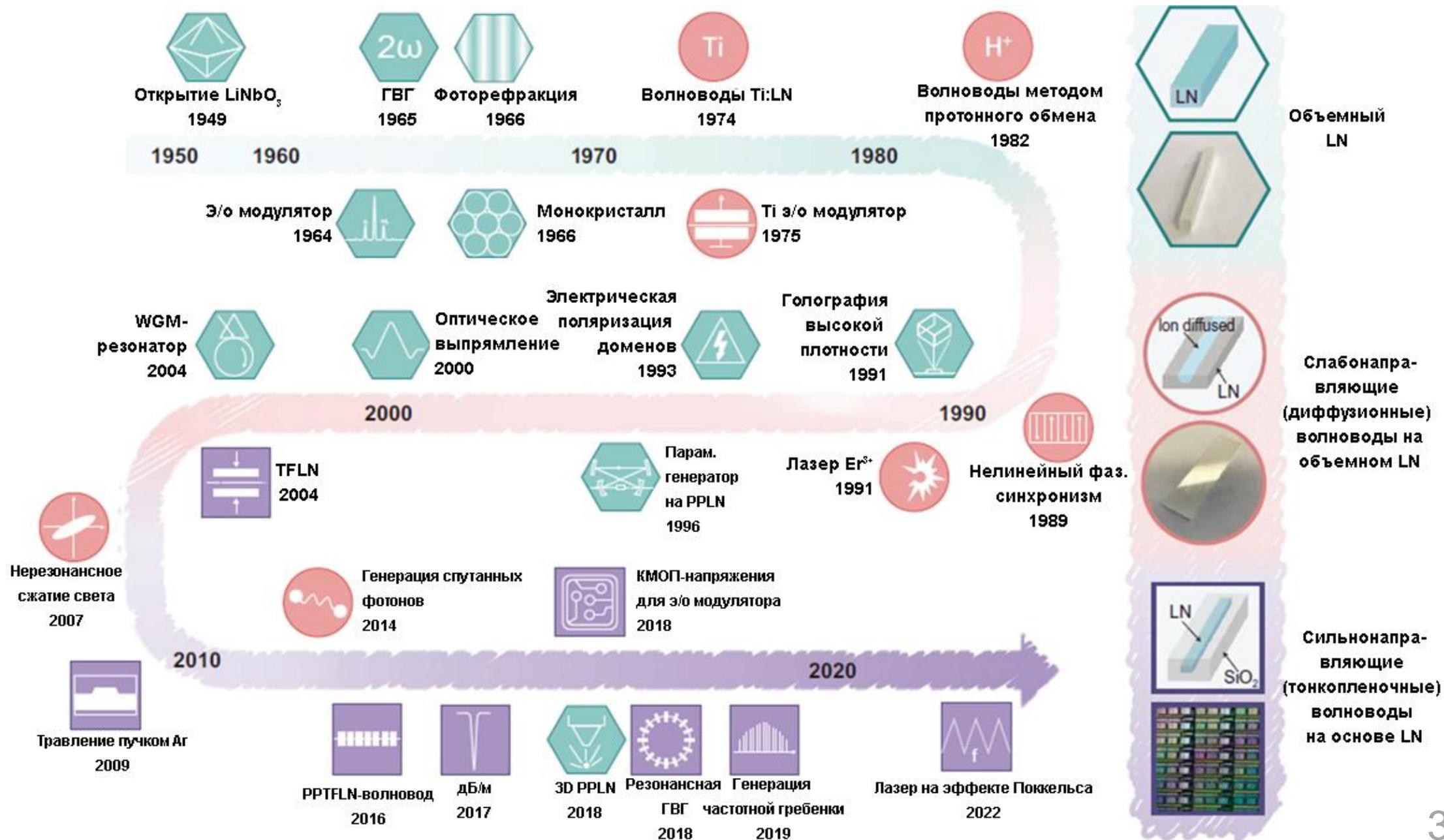
**Парфенов М.В., Варламов А.В., Ильичев И.В., Усикова А.А., Тронев А.В., Агрузов П.М.,  
Шамрай А.В.**

Лаборатория квантовой электроники

# Ниобат лития - материал интегральной оптики

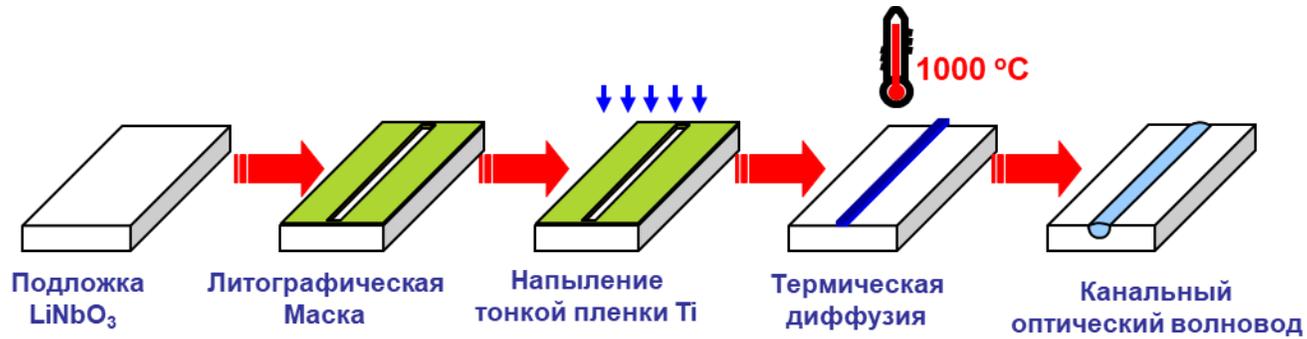


# Ниобат лития - материал интегральной оптики



# Оптические волноводы на подложках объёмного ниобата лития

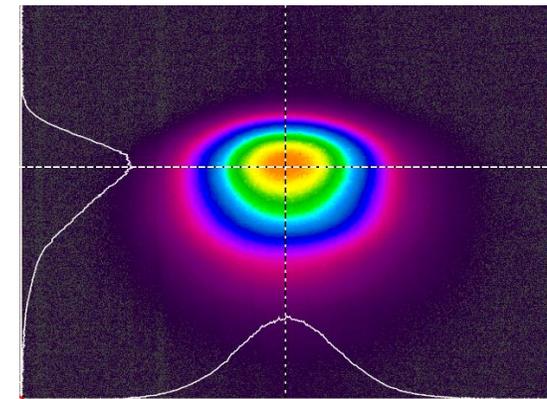
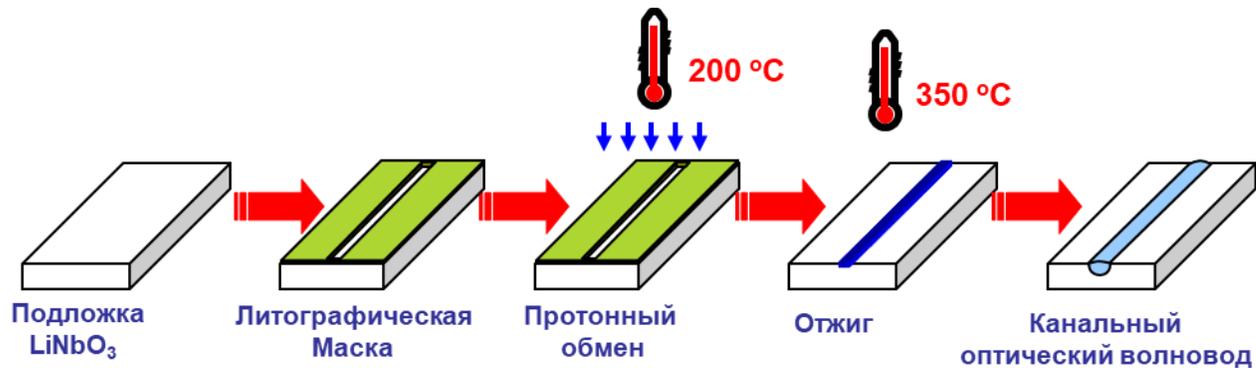
## Термическая диффузия металлов



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

**Внутренние потери**  
**< 0.01 dB/mm**  
**(1500 – 1600 nm)**

## Низкотемпературный протонный обмен



**Потери волокно-волокно**  
**X-срез 2.2 dB**  
**Z-срез 1.5 dB**



# Интегральная оптика на кристаллических подложках объемного ниобата лития

Проект РНФ № 24-91-22001



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

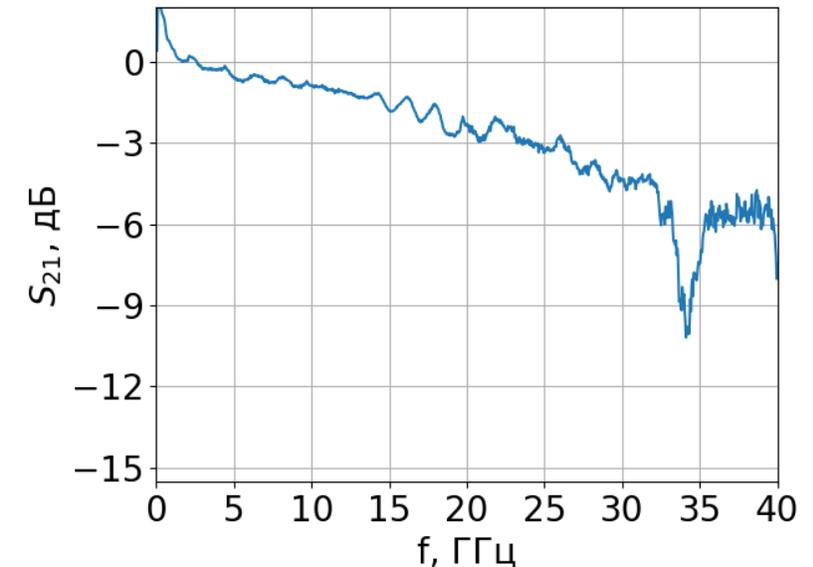
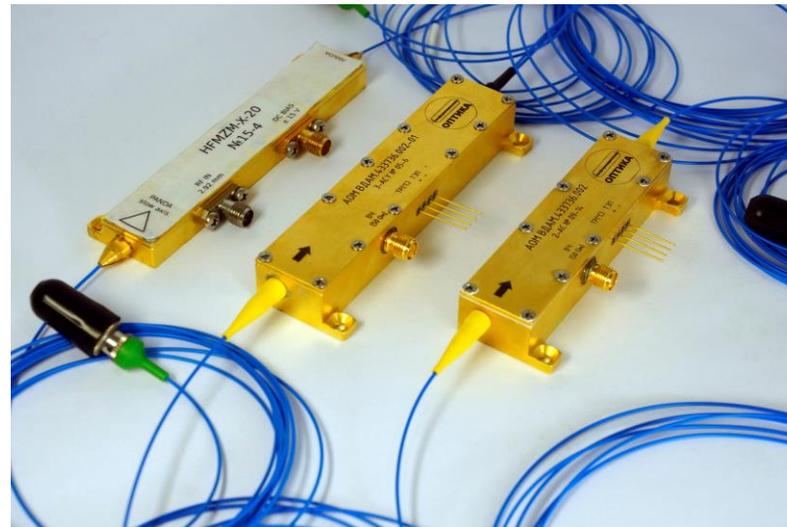
**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе**

Российской академии наук



**ОКБ-ПЛАНЕТА**  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

## Интегрально-оптические модуляторы



### Достоинства:

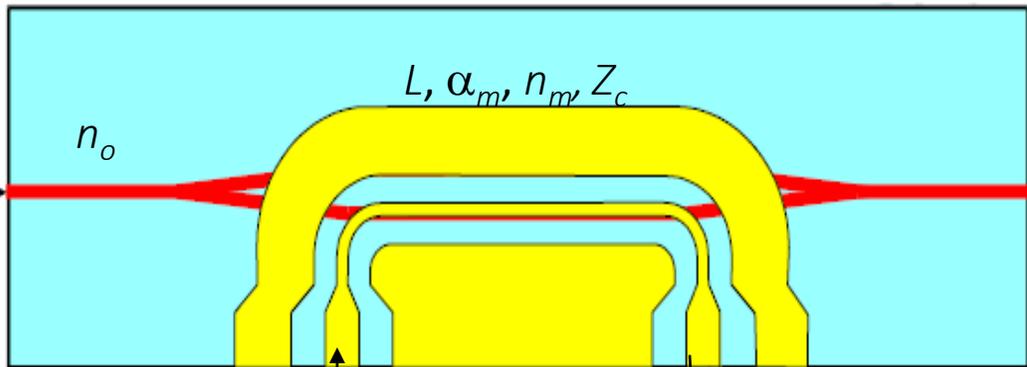
- низкие оптические потери (менее 0,1 дБ/см + 1 дБ на ввод/вывод);
- высокая стабильность и работа в экстремальных условиях;
- низкий уровень вносимых шумов;
- работа с высокой оптической мощностью.

### Проблемы:

- низкая числовая апертура – большой размер и низкая плотность элементов;
- невысокая эффективность электрооптической модуляции  $U_{\pi} L \approx 15 \text{ В}\cdot\text{см}$ ;
- компромисс между мощностью модулирующего сигнала и полосой частот ограничивает полосу частот (40 ГГц). 6

# Полоса частот модуляции

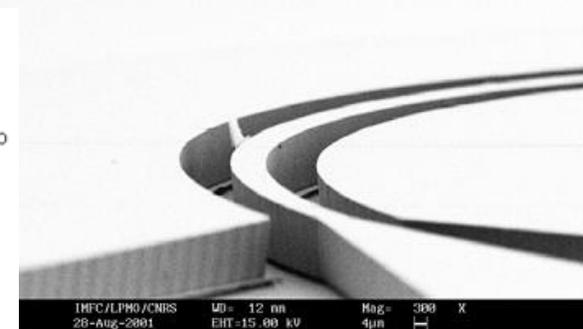
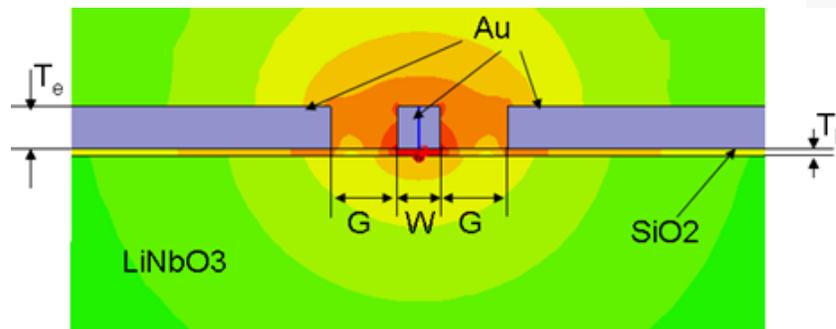
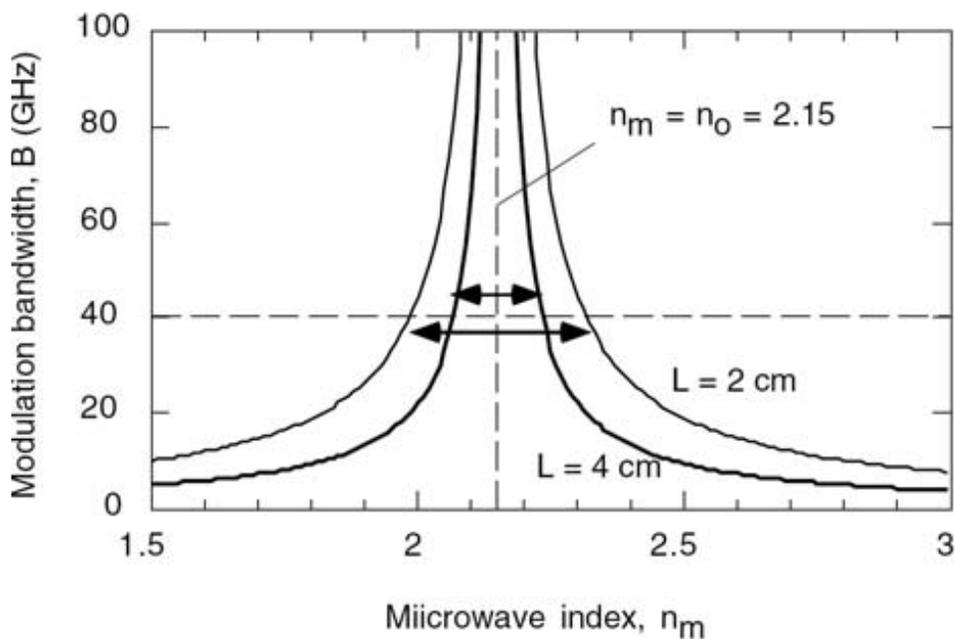
## СВЧ электроды бегущей волны



$f, Z_s$

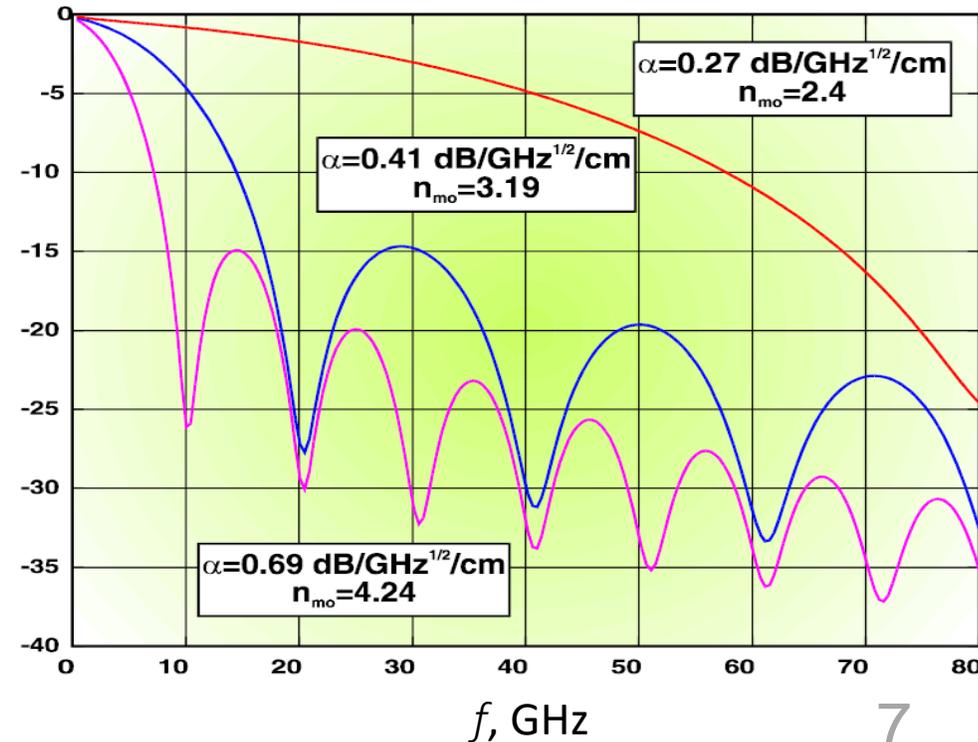
$Z_l$

$$\xi = \frac{2\pi f |n_{opt} - n_{mw}|}{c}$$



$$H(f) = \sqrt{(1 - k(f)) \frac{1 - 2e^{-\alpha(f)L} \cos(\xi(f)L) + e^{-2\alpha(f)L}}{(\alpha(f)L)^2 + (\xi(f)L)^2}}$$

$S_{21}, \text{ dB}$



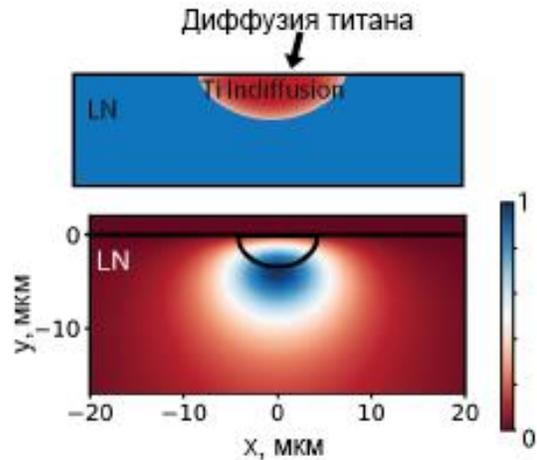
# Тонкопленочный ниобат лития (thin-film lithium niobate - TFLN): новый гибридный материал интегральной оптики

- 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).

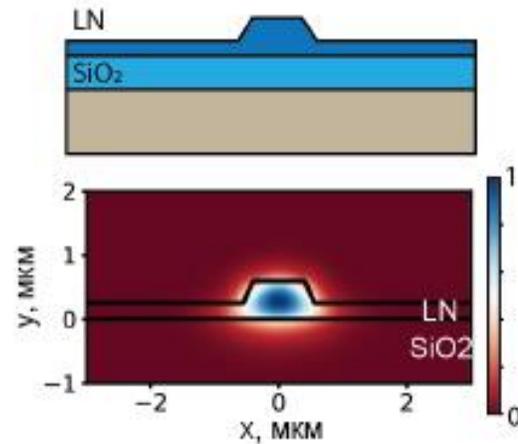


Формирование подложки с тонкопленочным ниобатом лития (TFLN)

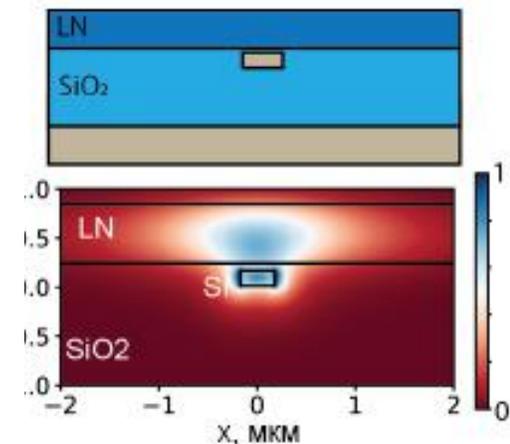
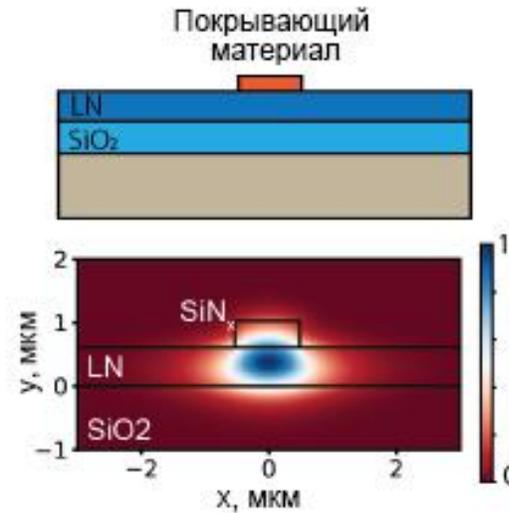
Волновод в объемном  
ниобате лития



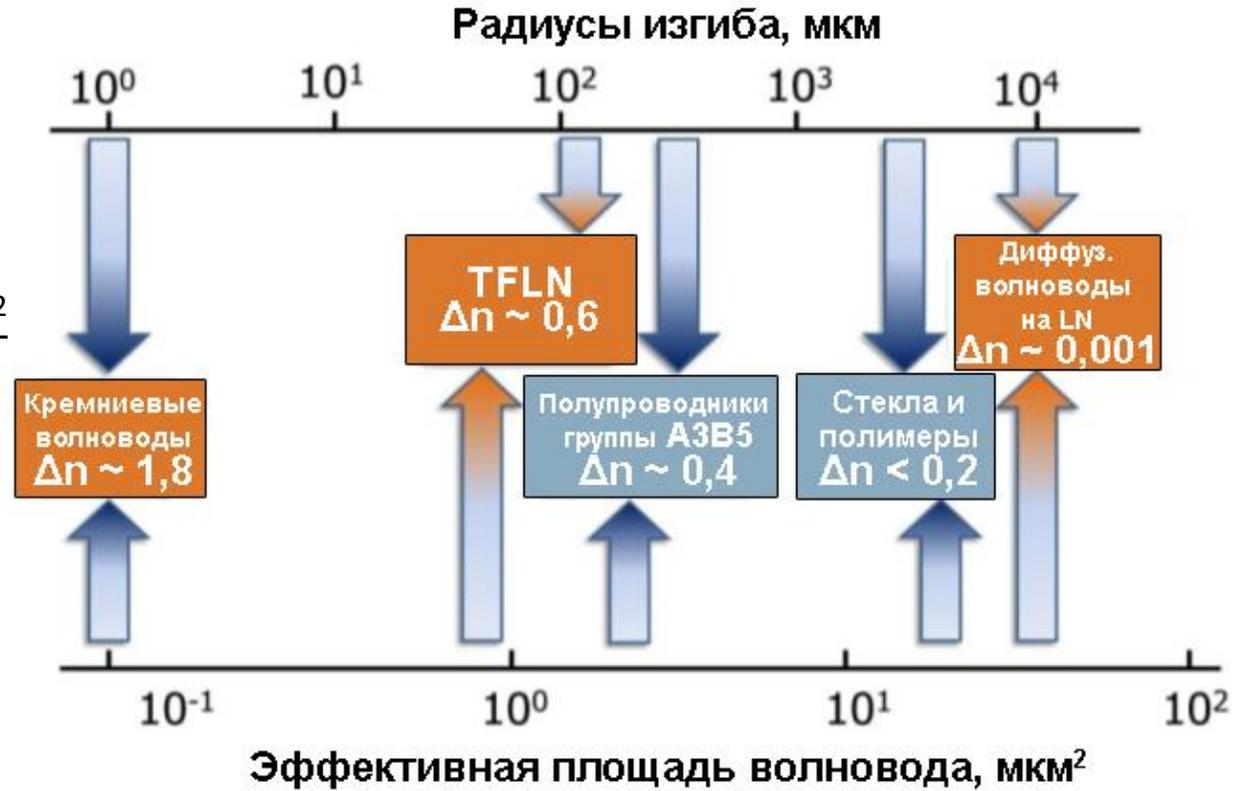
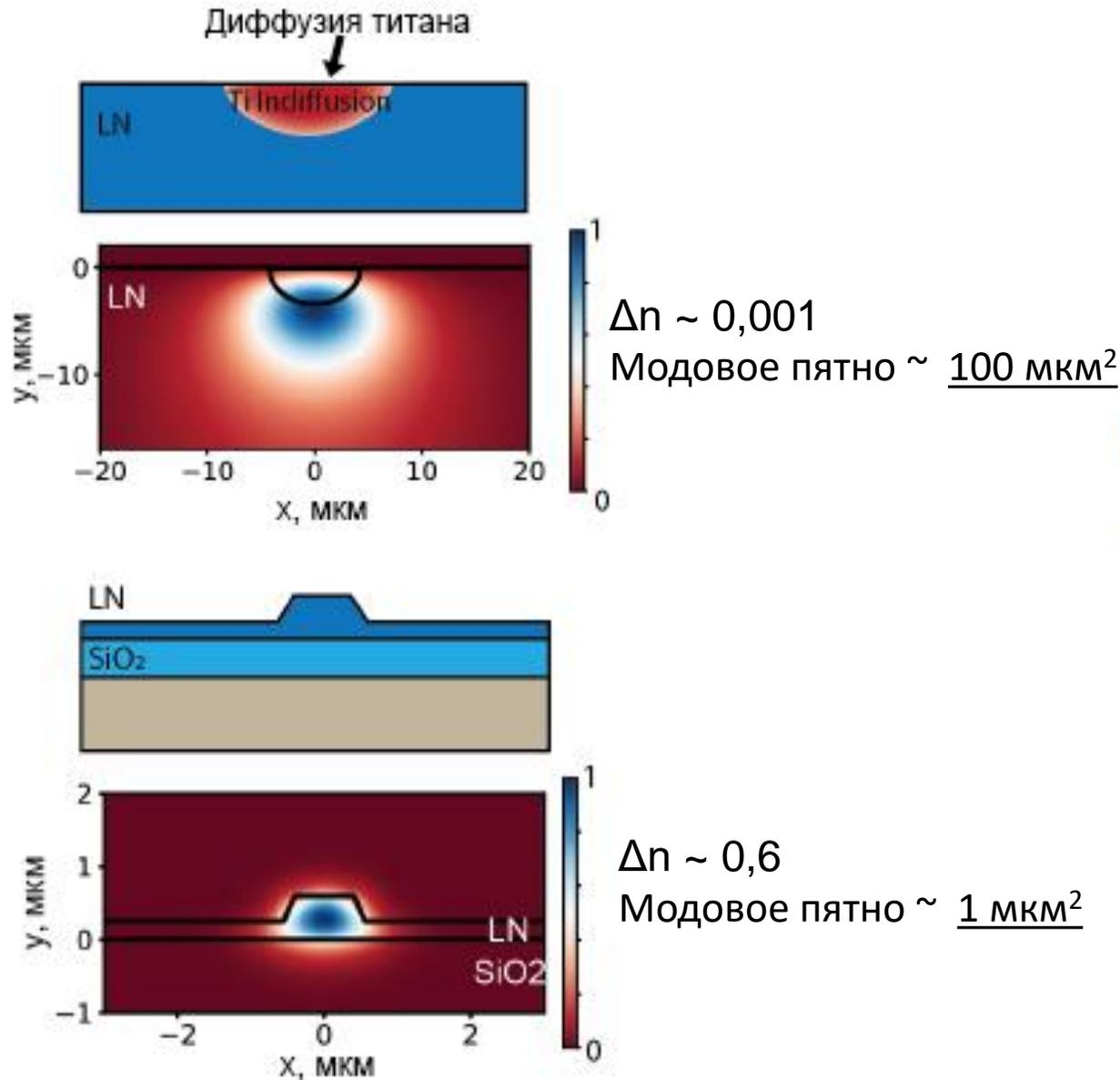
Волновод в монокристаллическом  
исполнении



Гибридные волноводы

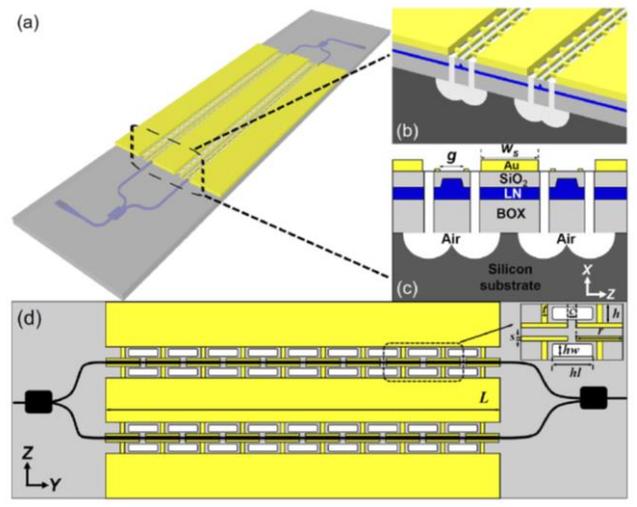


# Тонкопленочный ниобат лития (thin-film lithium niobate - TFLN): новый гибридный материал интегральной оптики



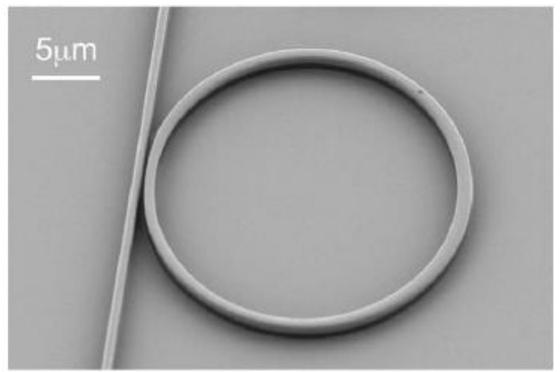
# Новые интегрально-оптические элементы и новые функциональные возможности

## Высокоэффективные модуляторы



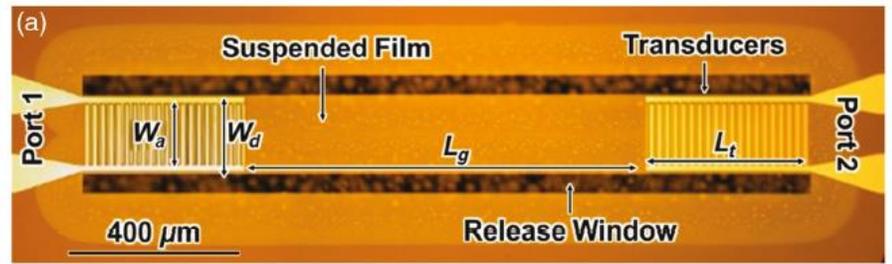
DOI:10.1063/5.0065437

## Кольцевые резонаторы



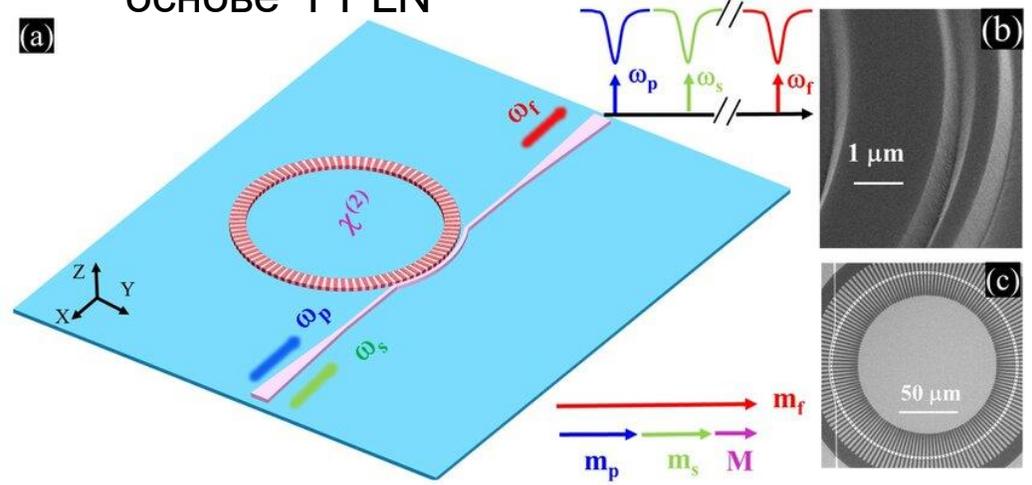
DOI: 10.1016/j.optmat.2007.12.019

## Гигагерцовые ВШП



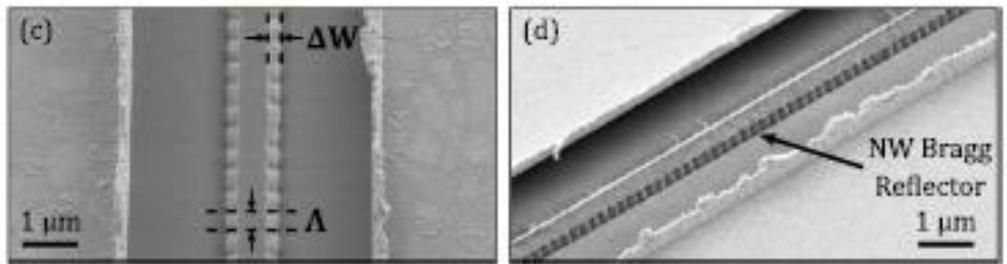
DOI: 10.1109/ULTSYM.2018.8580062

## Высокоэффективные преобразователи частоты на основе PPLN



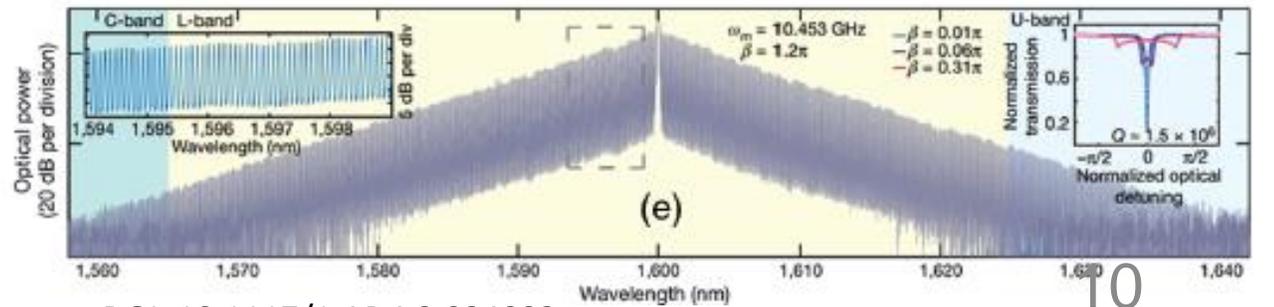
DOI:10.3788/COL202119.060012

## Волноводные брэгговские решетки



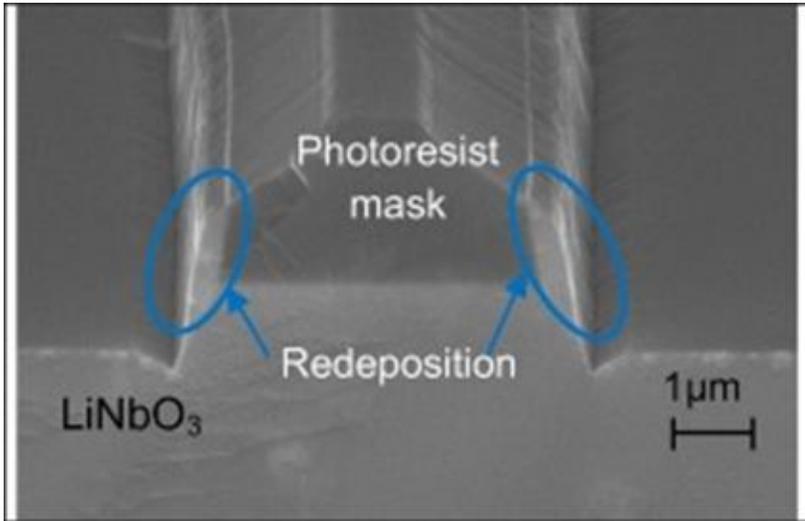
DOI: 10.1364/OL.43.001515

## Генераторы частотных гребенок

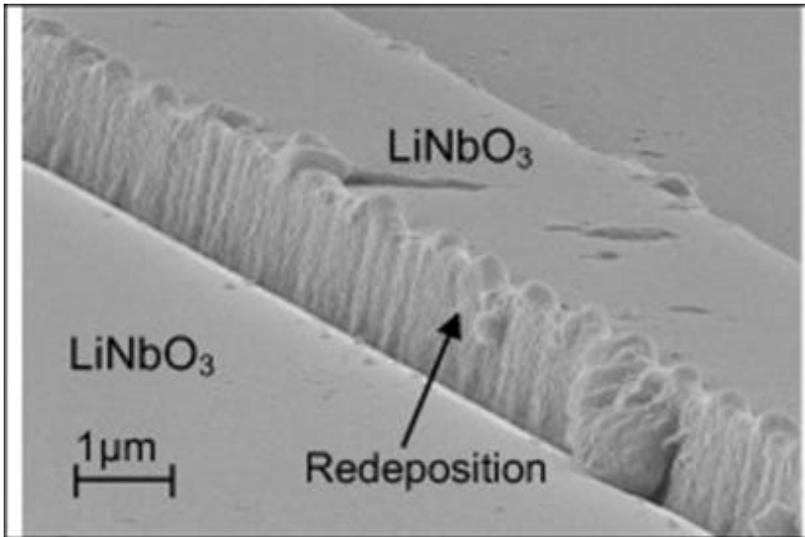


DOI: 10.1117/1.AP.4.3.034003

# Высокие требования к технологии формирования волноводного канала

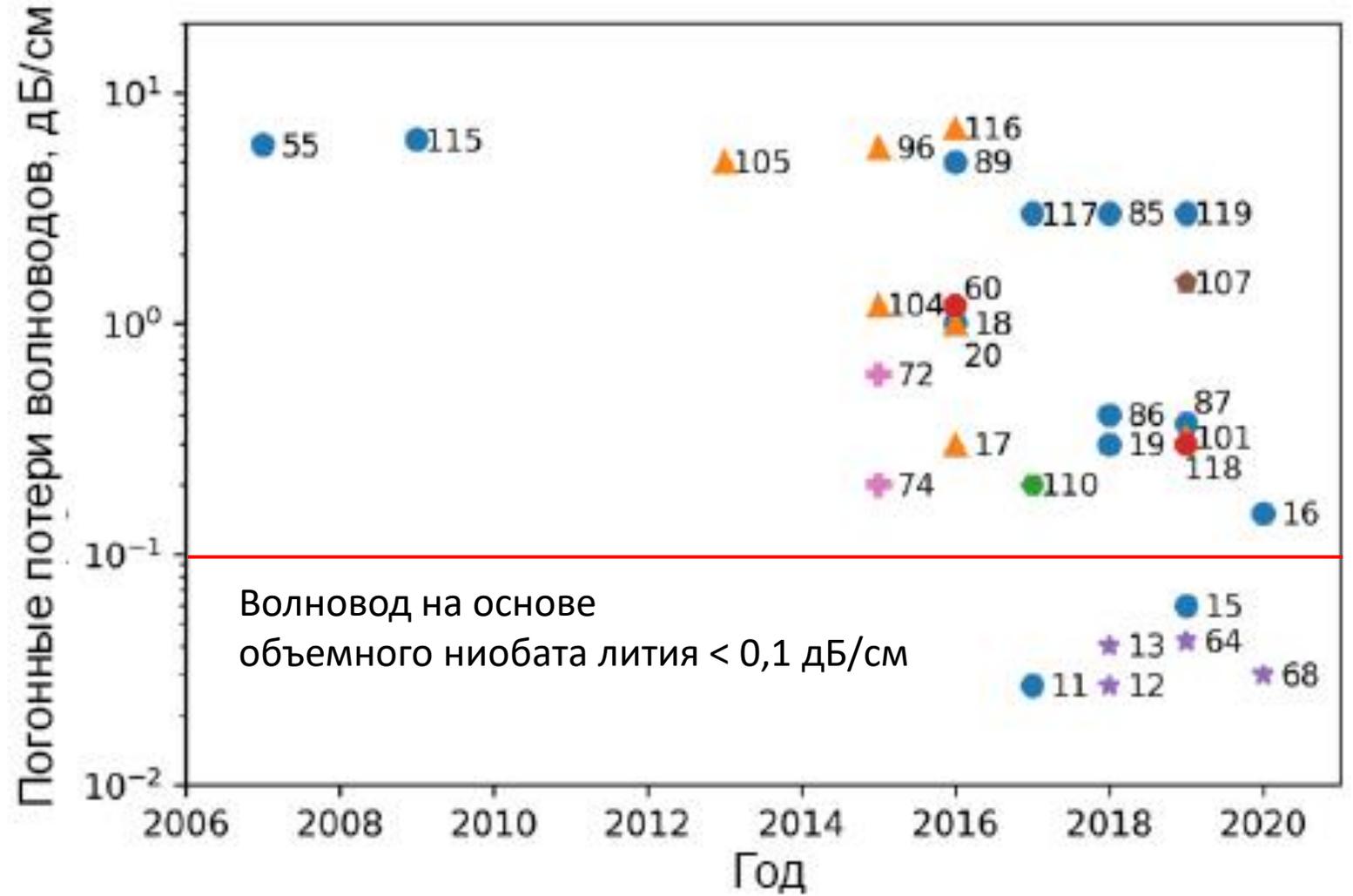


(a)

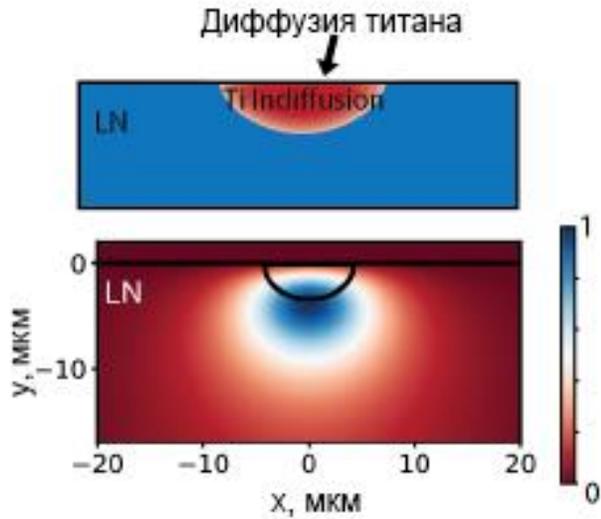


(b)

DOI: 10.1364/AOP.411024

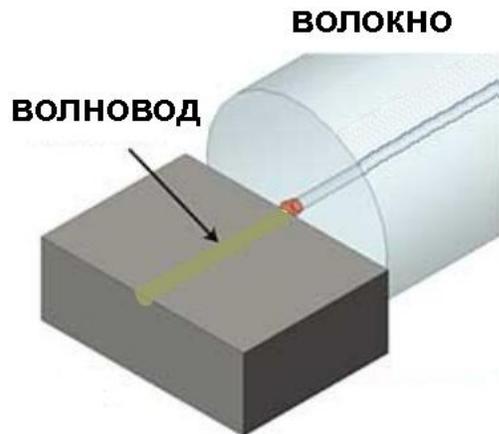


# Проблема согласования с волоконно-оптическим трактом

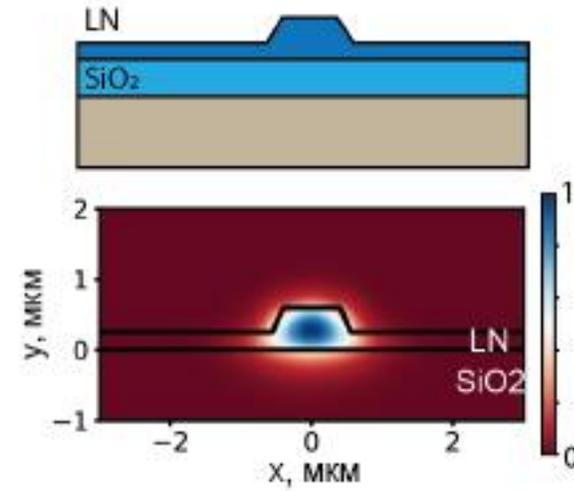


Размер моды: 10 мкм

Согласован с размерами моды стандартного оптического волокна (потери порядка  $0,5 \div 0,7$  дБ/стык)

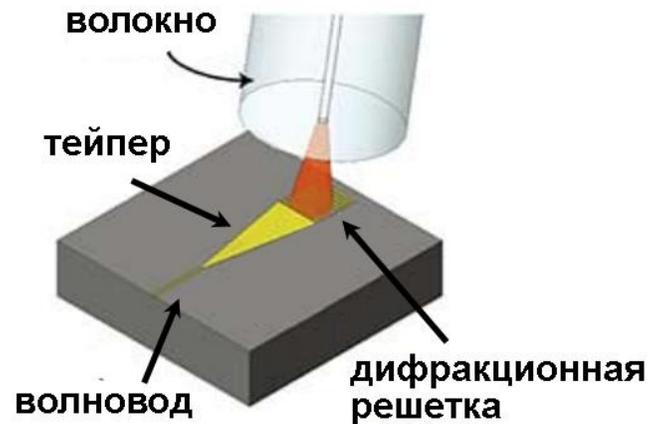


Обычный торцевой ввод

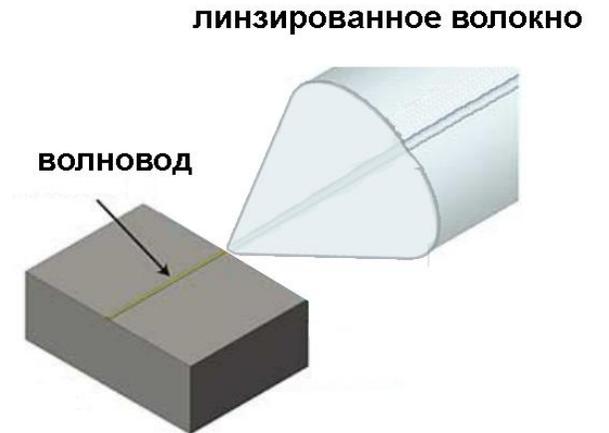


Размер моды: 1-2 мкм

Требуются специальные техники стыковки!



Ввод через дифракционную решетку



Ввод через линзированное волокно

# Сверхширокополосные модуляторы на основе TFLN

(возможности)

Большой контраст показателя преломления (на 3 порядка,  $\Delta n \sim 1$  против  $\Delta n \sim 0,001$ )



Меньшие размеры волноводов и волноводных элементов



Можно ближе расположить электроды



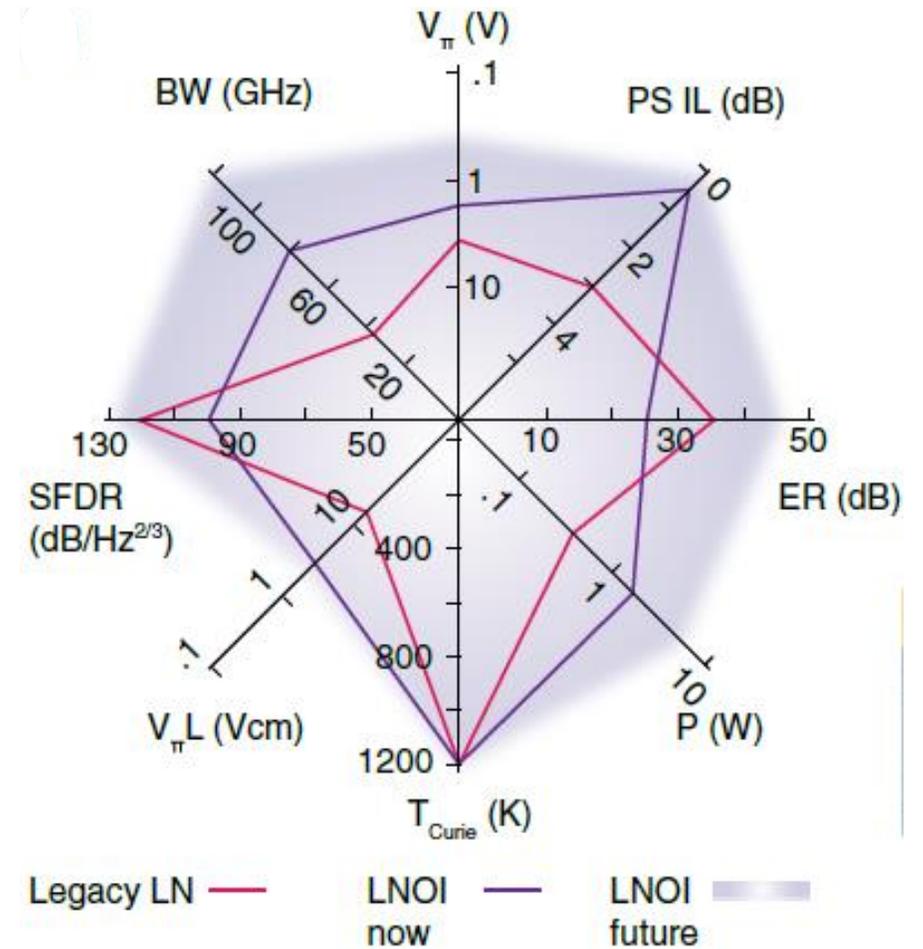
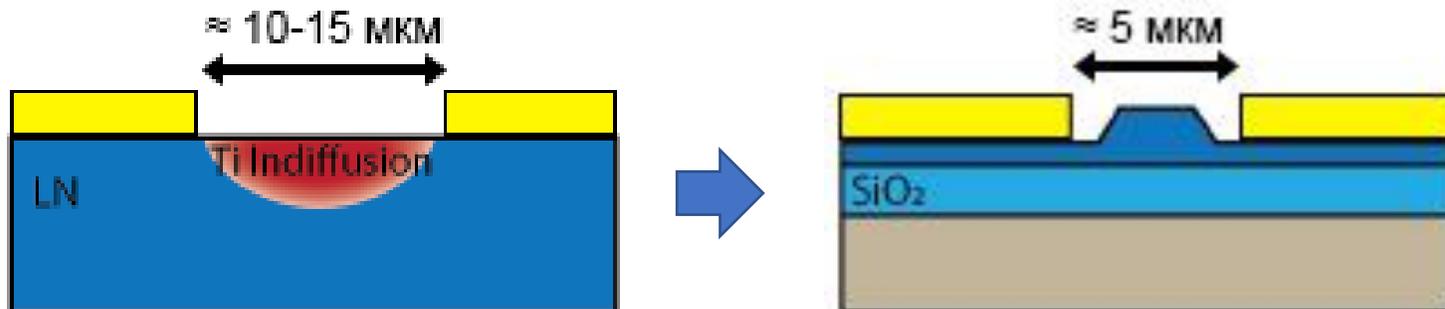
Снижается полуволновое (управляющее) напряжение



Можно сделать электроды короче



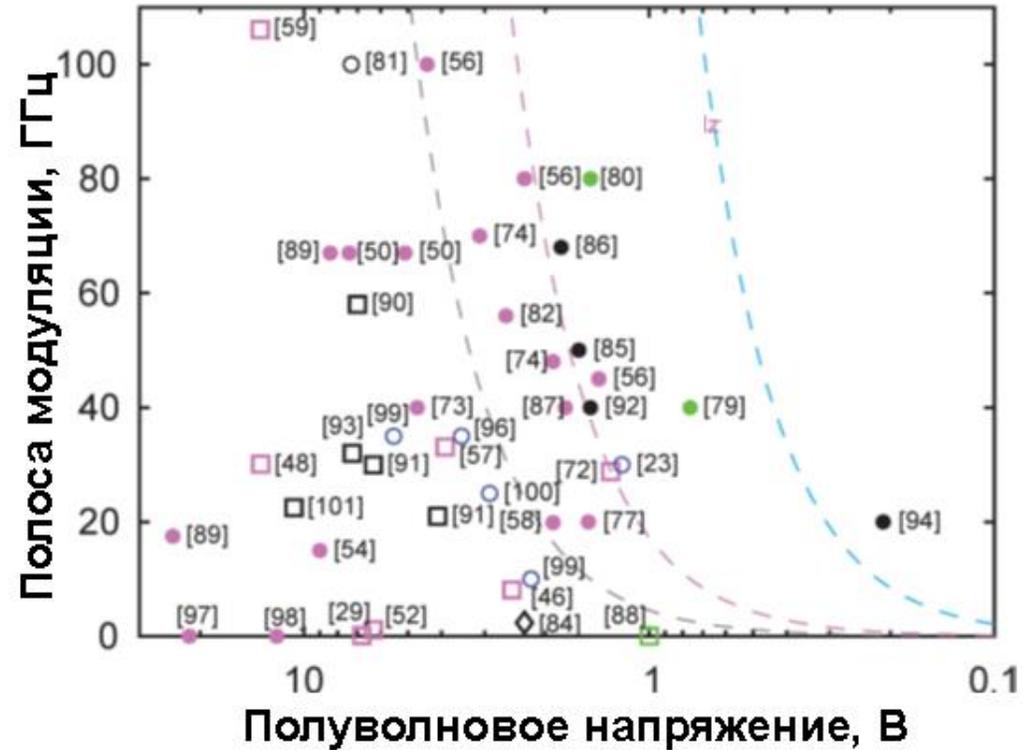
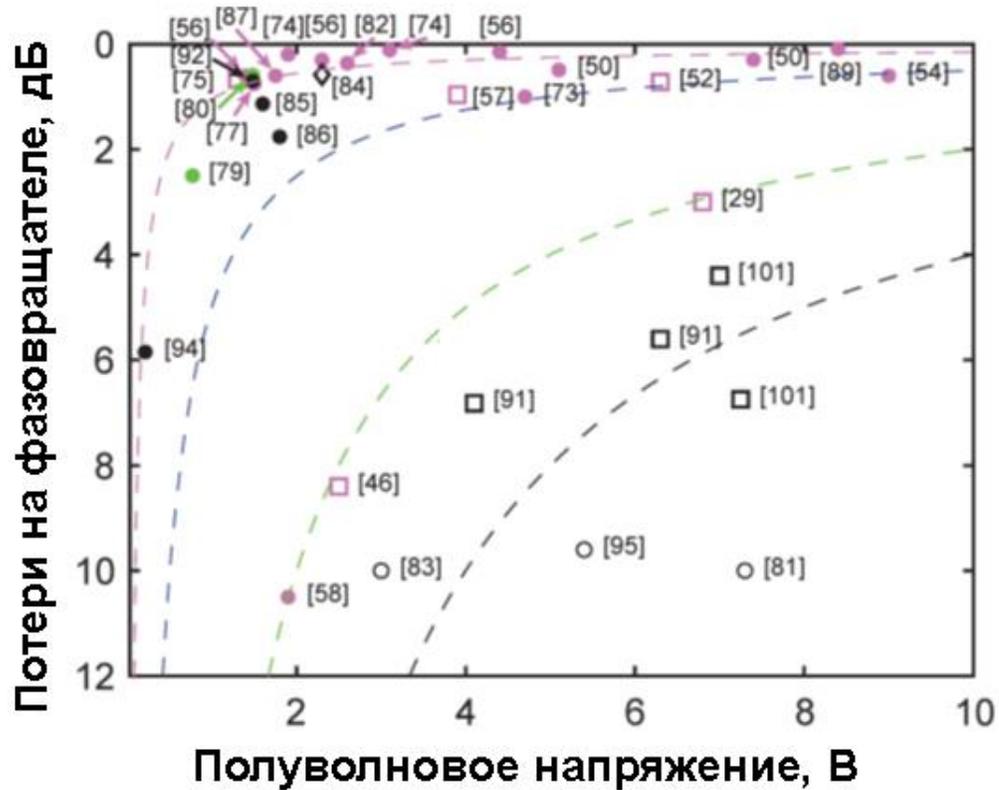
**Шире полоса частот модуляции (100 ГГц и больше)**



# Сверхширокополосные модуляторы на основе TFLN

(достигнутый уровень)

DOI: 10.1364/OPTICA.415762



DQPSK модулятор на основе TFLN (длина 30 мм)  
Источник: Fujitsu

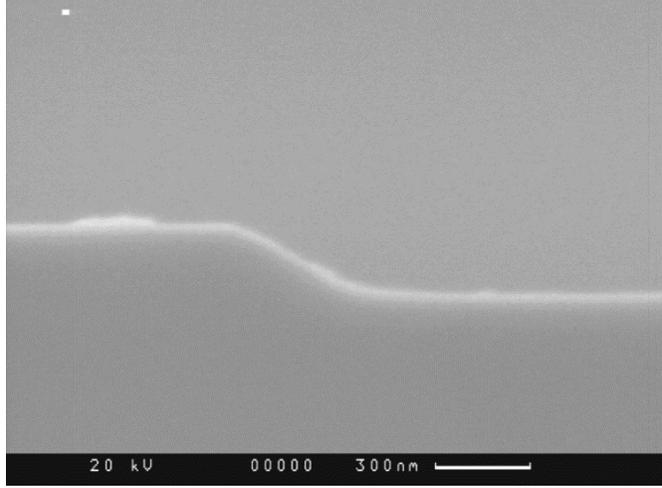
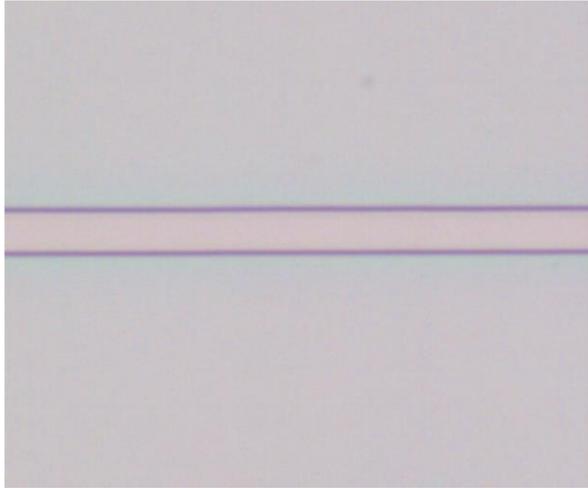


TFLN-модулятор с полосой 110 ГГц  
Источник: HyperLight Corp., Кембридж

# Результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе

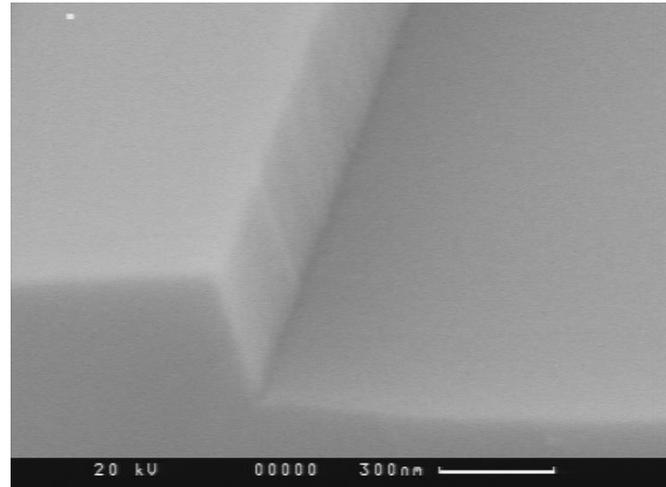
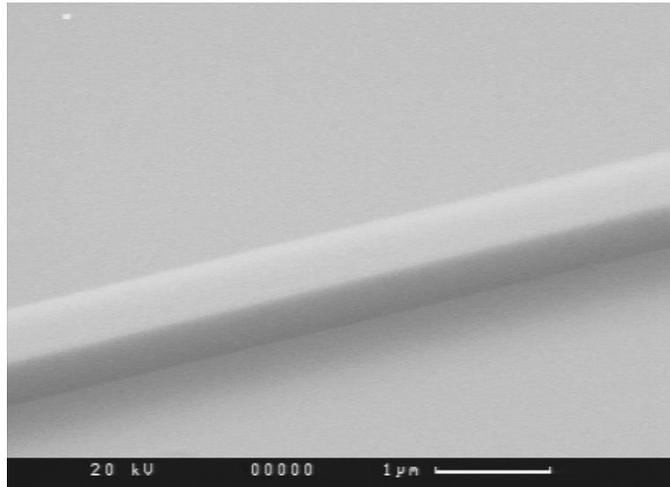
## Технология формирования волноводов

Сухое травление ионным пучком (аргон), маска – задублированный фоторезист 1 мкм.



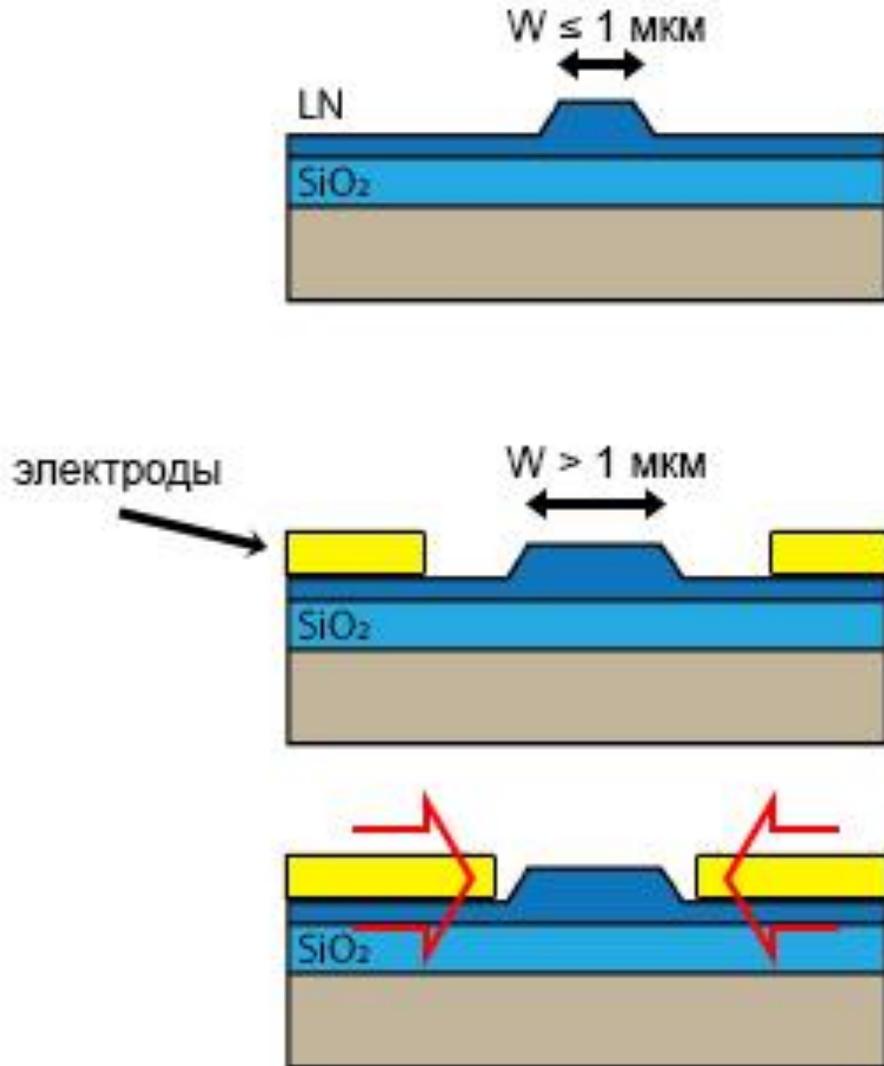
Ровный край.  
Низкая шероховатость боковой стенки.  
Большой угол отклонения от вертикали из-за низкой селективности маски.

Плазмохимическое травление ( $\text{SF}_6$ ), маска – никель 63 нм.



Ровный край.  
Приемлемая шероховатость боковой стенки.  
Небольшое отклонение от вертикали.

## Использование контактной фотолитографии



Изготовление: электронно-лучевая литография или фотолитография в глубоком УФ (долго, дорого)

Возможность использования стандартной контактной фотолитографии видимого диапазона длин волн? (доступно, быстро, дешево, но – низкое разрешение!)

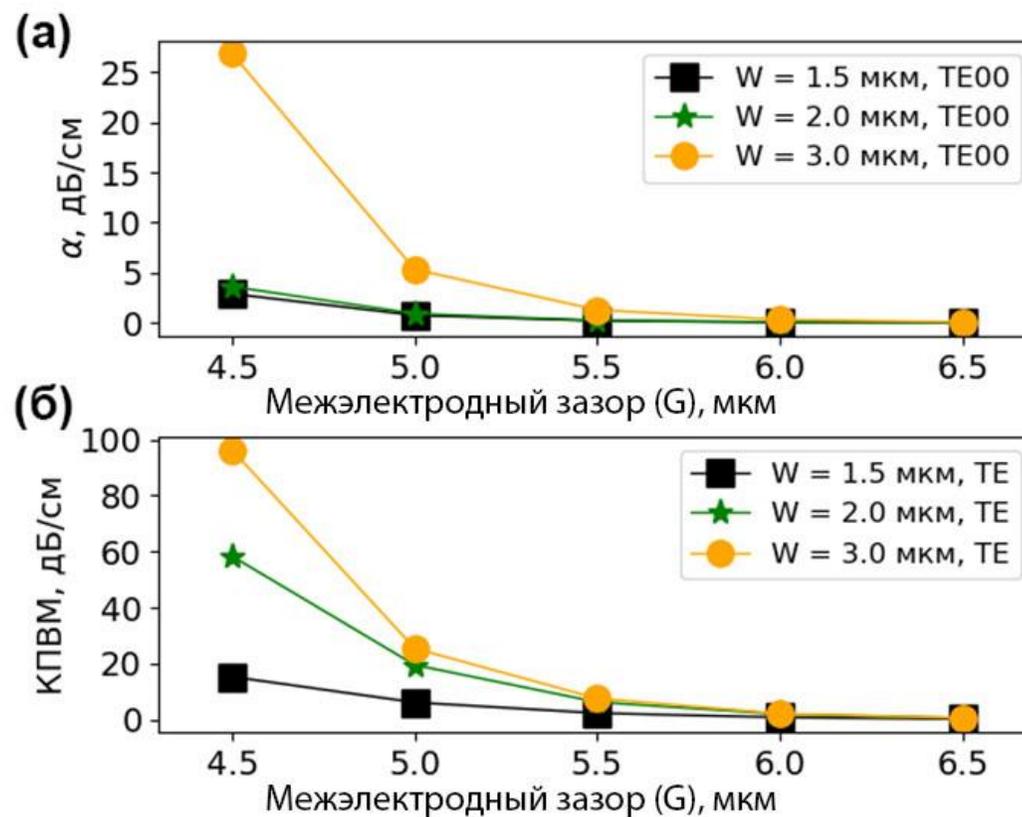
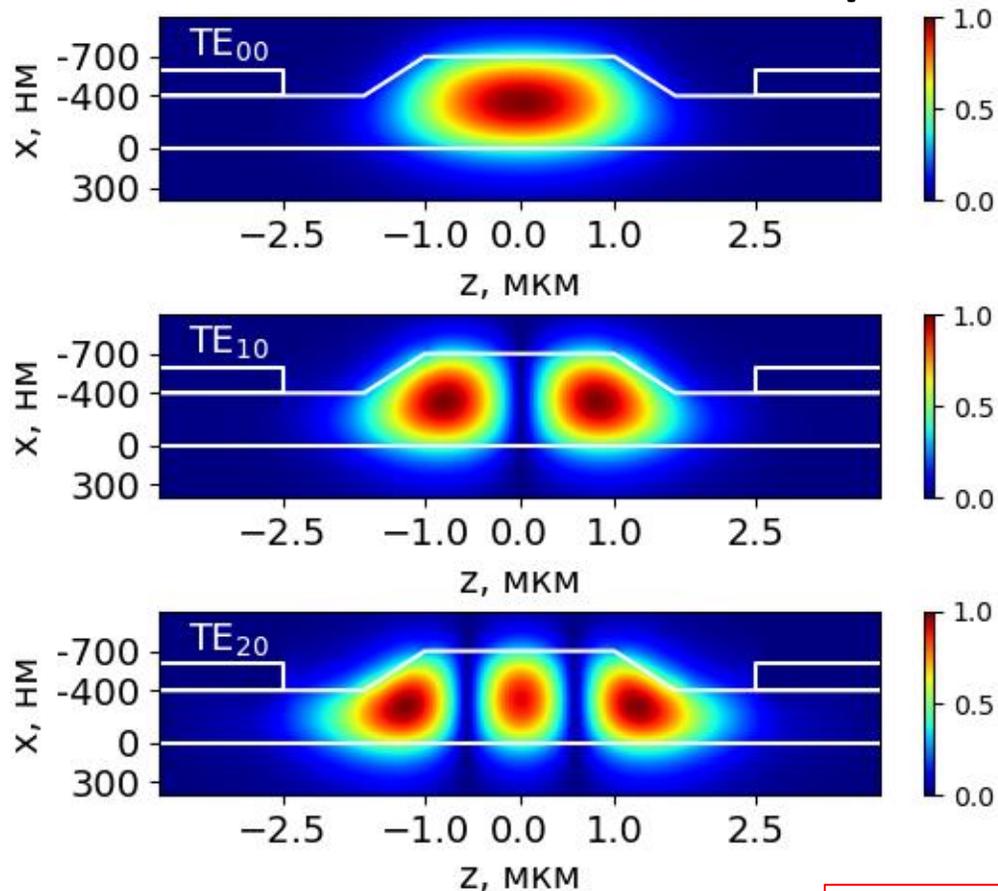
если  $W > 1 \mu\text{m}$ : **волноводы многомодовые!!!**  
изготовление одномодовых волноводов – невозможно!

Идея: обеспечить квазиодномодовый режим!



Цель: использовать металлические электроды для фильтрации фундаментальной моды и подавления высших мод

## Использование контактной фотолитографии



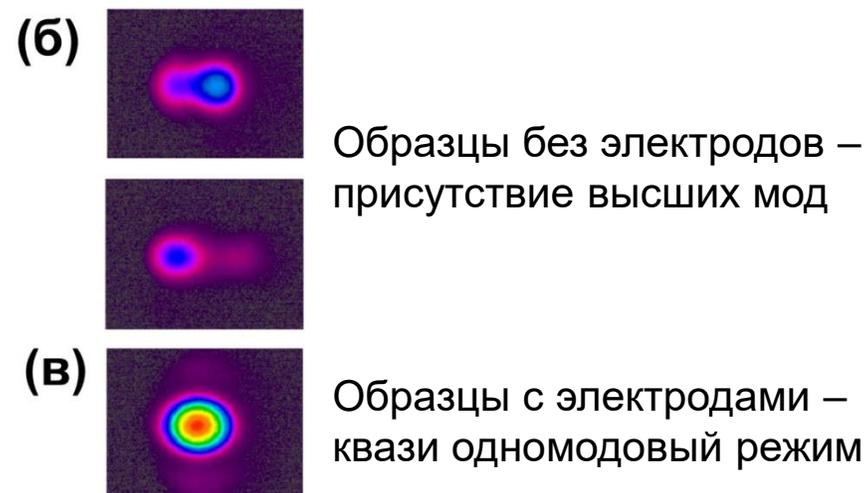
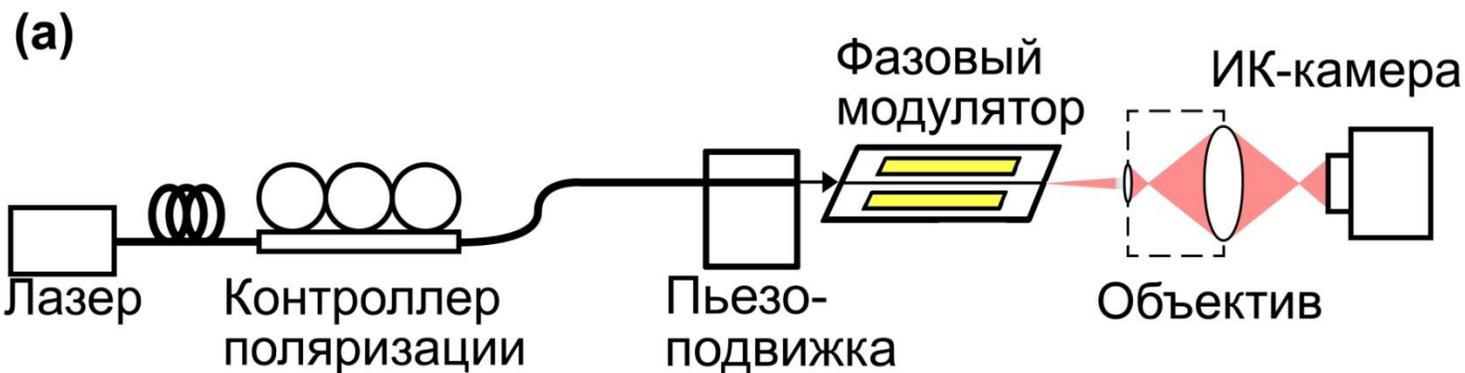
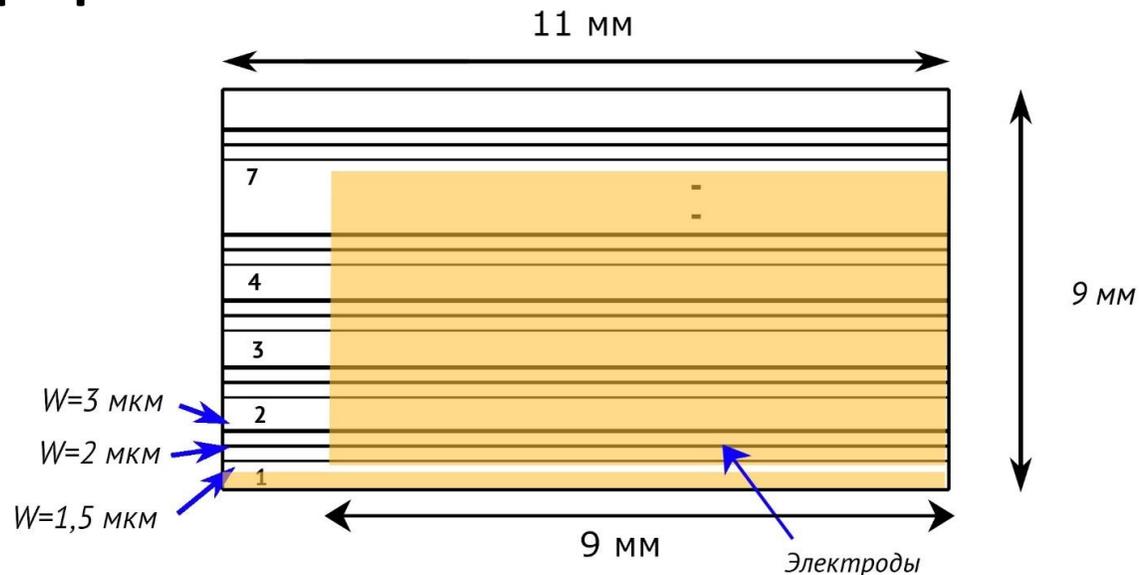
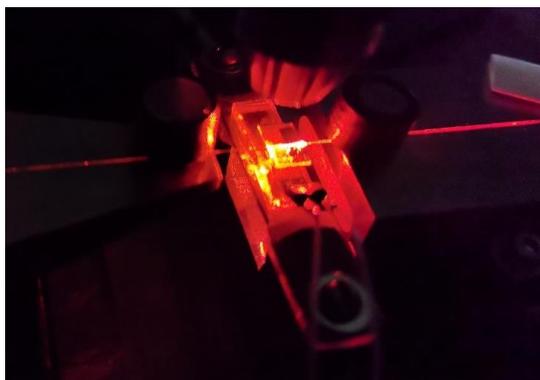
Пространственное распределение нормированного абсолютного значения горизонтальной компоненты электрического поля мод в волноводе на основе TFLN с шириной травленого гребня  $W = 2$  мкм

$$KPV = \alpha_{TE10} - \alpha_{TE00} \quad [\text{дБ/см}]$$

**Модовая фильтрация возможна!**  
При межэлектродном зазоре  $G = 5$  мкм  
Подавление высших мод  $> 20$  дБ/см!

(а) Зависимость потерь фундаментальной моды и (б) зависимость коэффициента подавления высших мод (КПВМ) от ширины межэлектродного зазора ( $G$ )

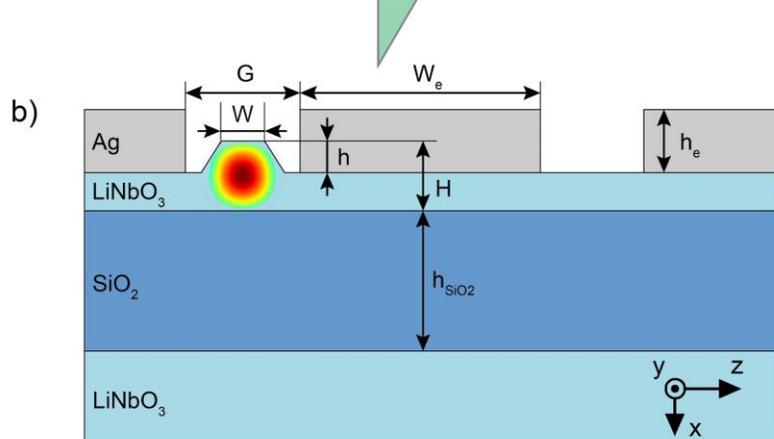
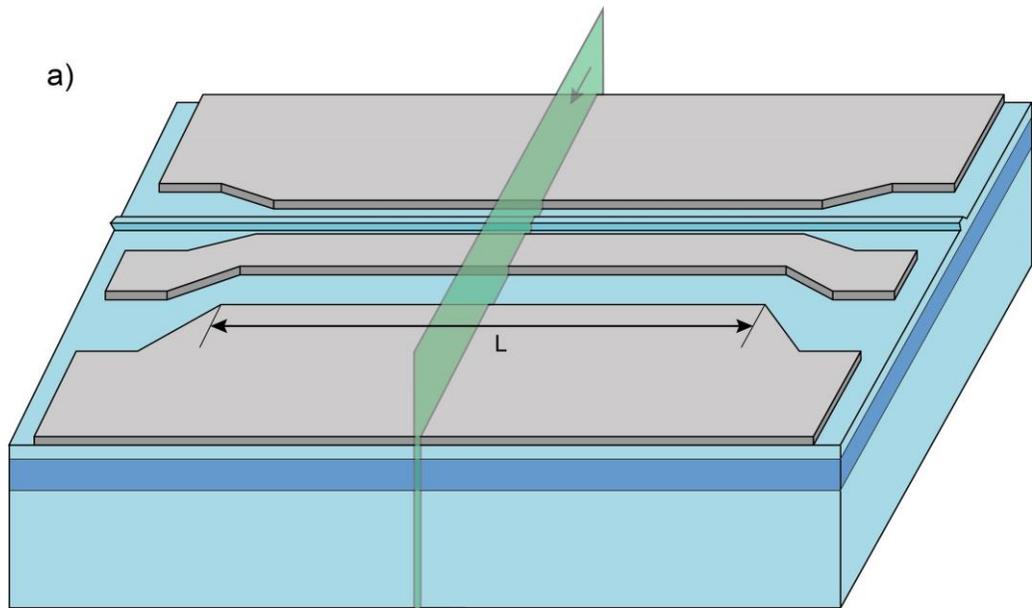
## Использование контактной фотолитографии



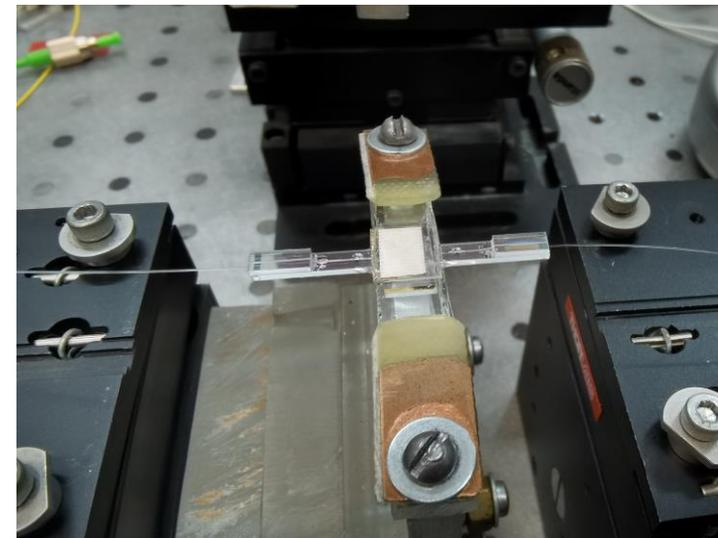
Установка для определения модового состава волноводов (а) и распределения интенсивности на выходе волноводов: без электродов (б) и с электродами (в)

# Результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе

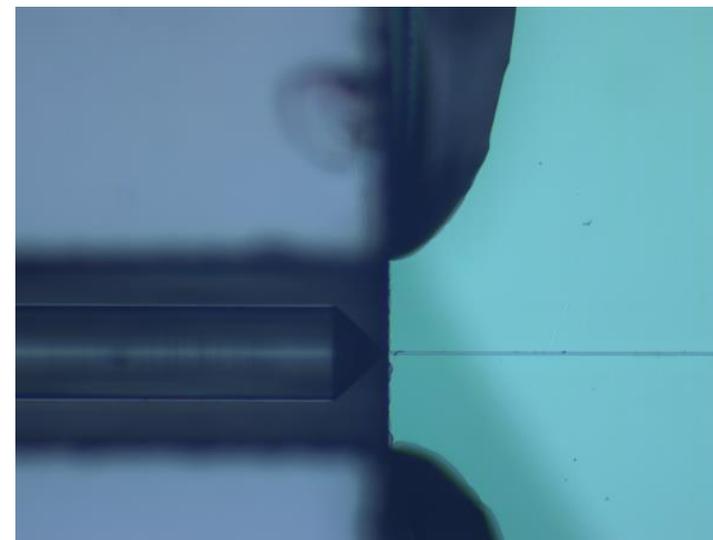
## Фазовый модулятор: экспериментальный образец



$L = 4.9$  мм и  $10$  мм  
 $W = 2$  мкм  
 $H = 700$  нм  
 $h = 300$  нм  
 $h_{SiO_2} = 2$  мкм  
 $G = 5$  мкм  
 $h_e = 2$  мкм  
 $W_e = 10$  мкм



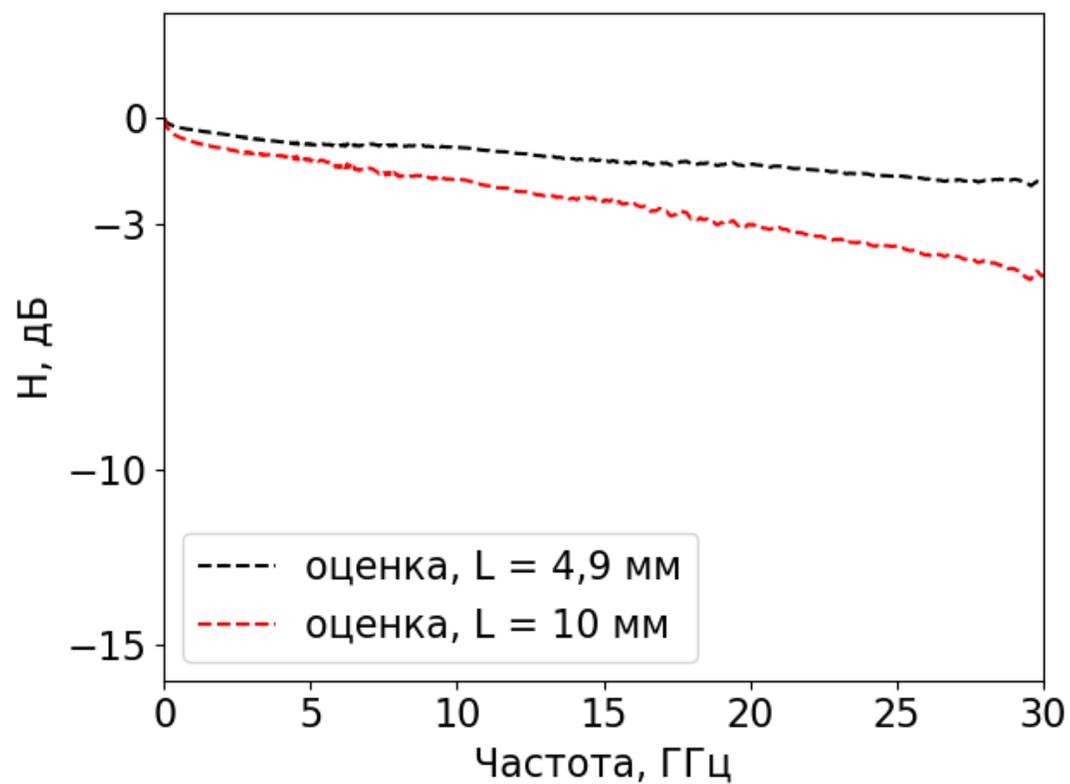
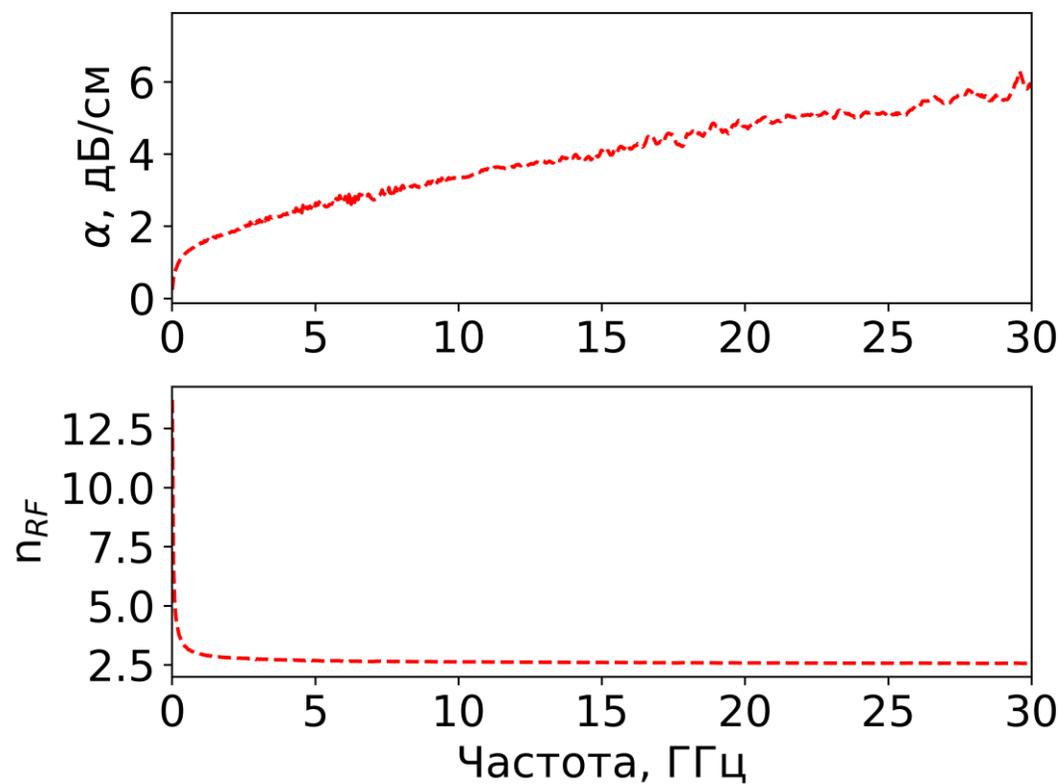
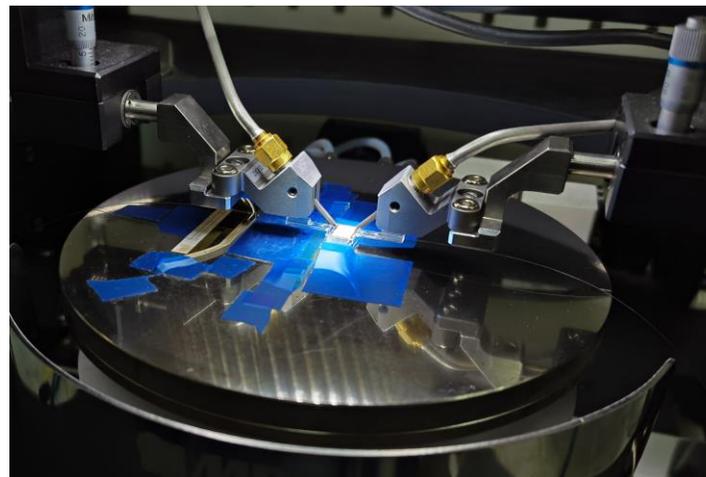
*TFLN-модулятор, состыкованный с оптическими волокнами*



*Стыковка волновода чипа с линзированным волокном*

# Результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Фазовый модулятор:  
параметры СВЧ электродов



# Результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе

## Фазовый модулятор: оптические измерения

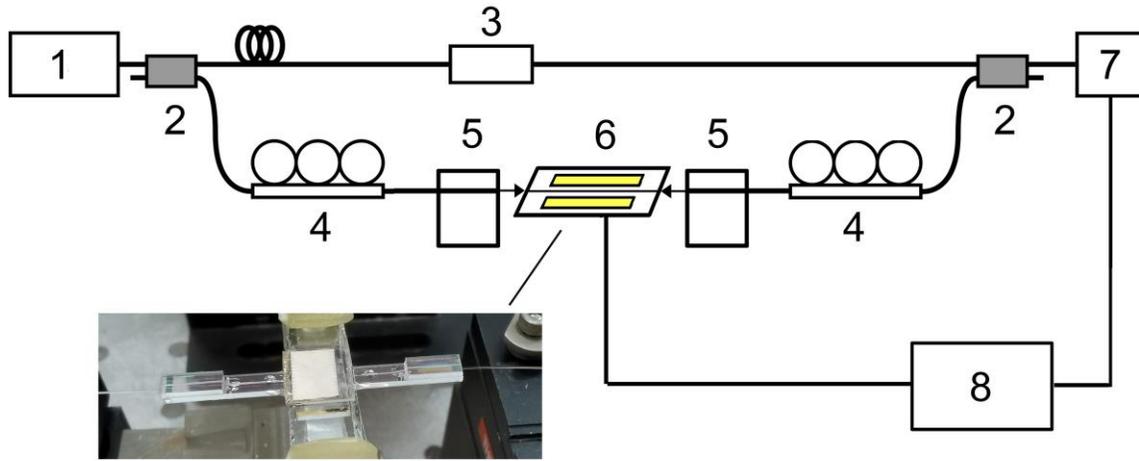
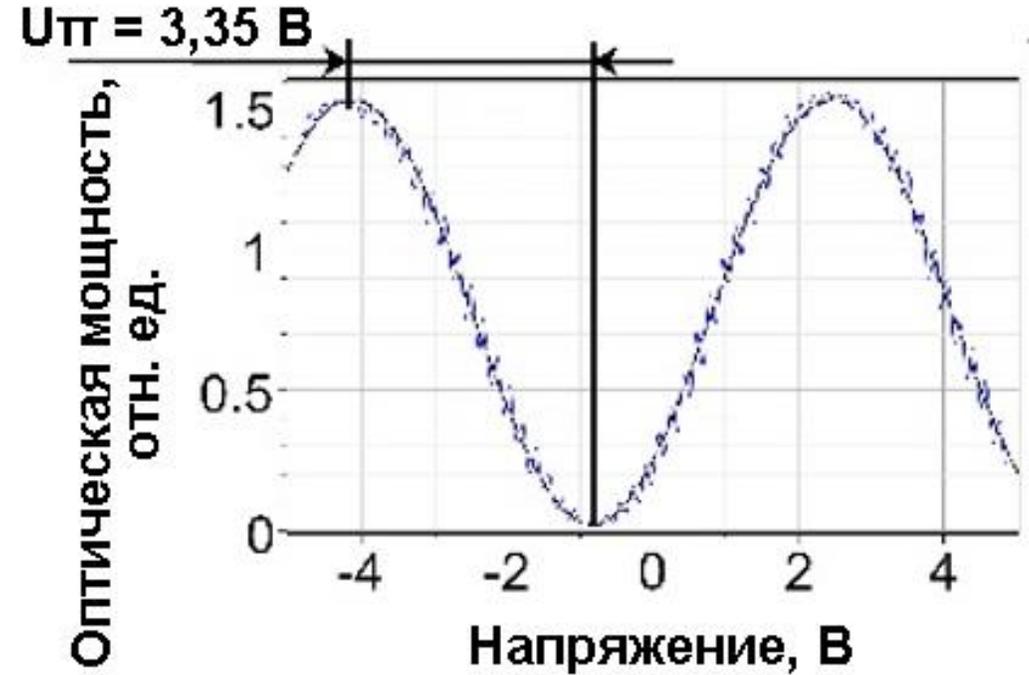


Схема экспериментальной установки для измерения характеристик изготовленных образцов модуляторов (1 – лазер, 2 – волоконный разветвитель, 3 – аттенюатор, 4 – контроллер поляризации, 5 – пьезоподвижка, 6 – модулятор, 7 – фотоприемник, 8 – векторный анализатор)



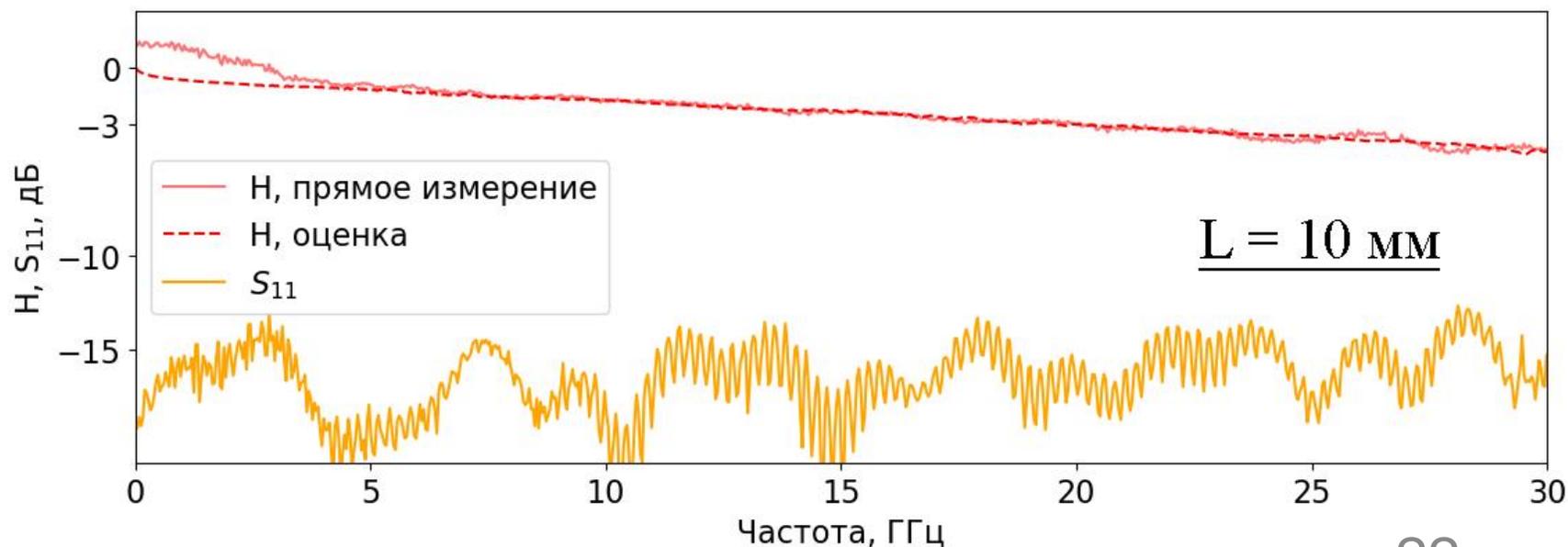
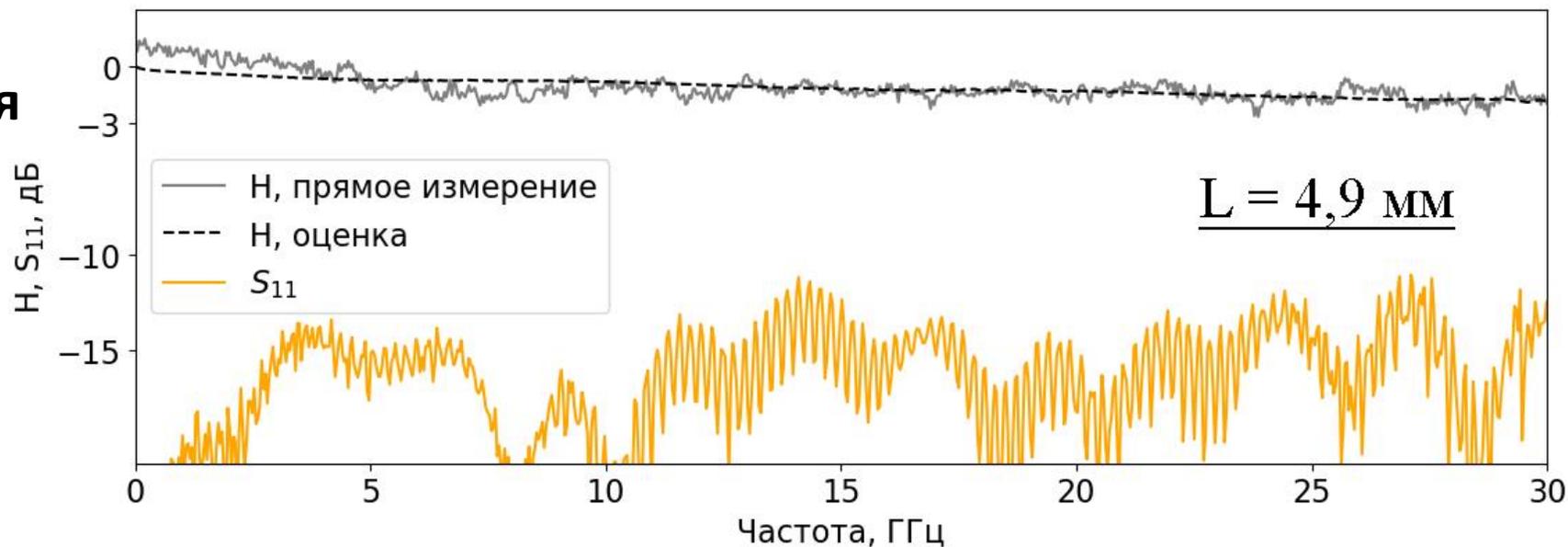
$$U_{\pi} = 3,35 \text{ В}$$
$$L = 12 \text{ мм}$$

$U_{\pi} L = 4,02 \text{ В*см}$   
в “push-pull” конфигурации  
около  $2 \text{ В*см}$   
В модуляторе на объемном  
ниобате лития  $U_{\pi} L \approx 15 \text{ В*см}$

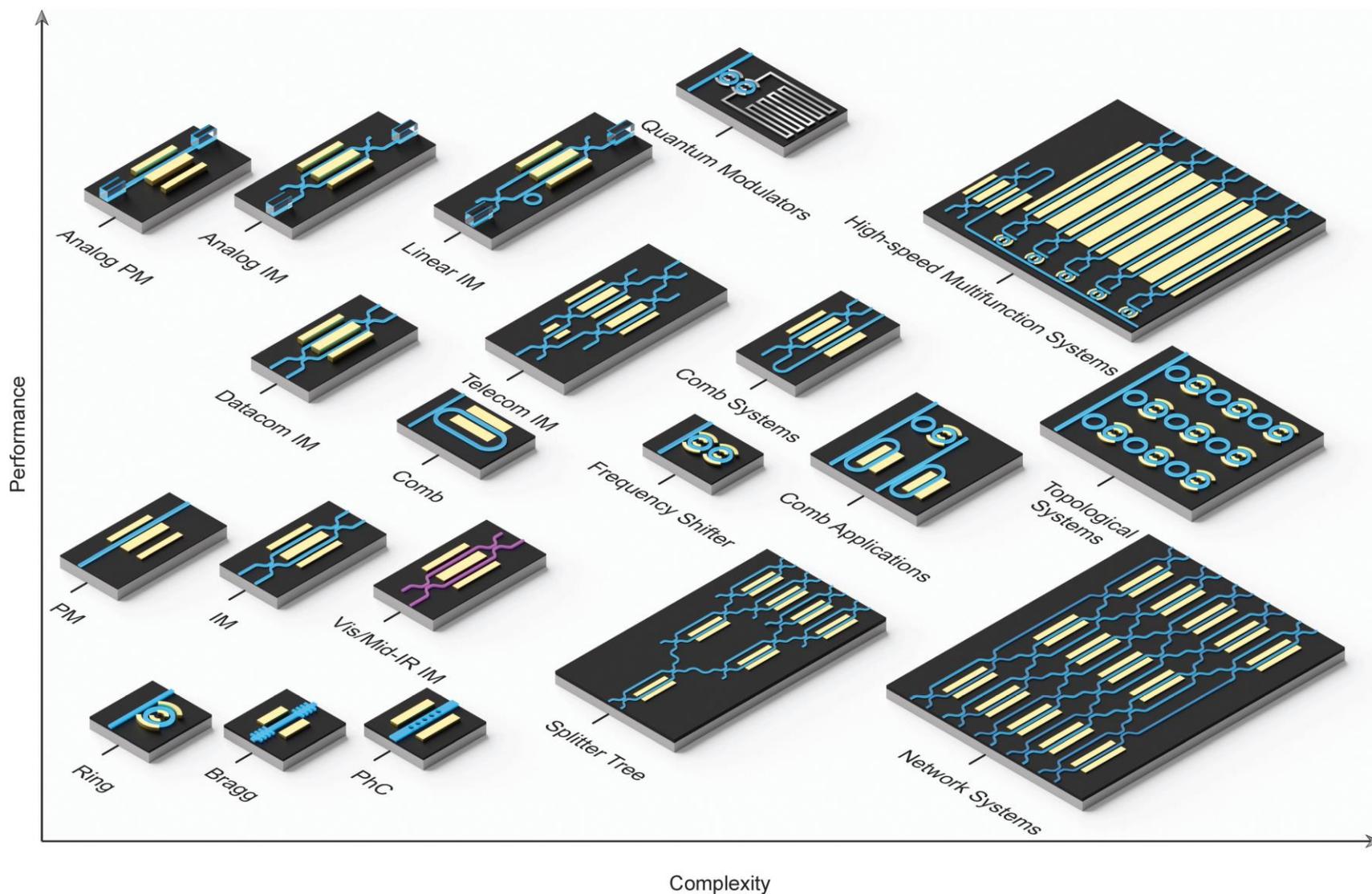
# Результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе

## Фазовый модулятор: оптические измерения

*Электрооптический отклик (H) и отражения на СВЧ ( $S_{11}$ ) для изготовленных образцов СВЧ-модляторов*



# Необходимо решить проблему масштабирования



Сохранение характеристик при увеличении количества элементов.

Возможности гибридизации с другими материальными платформами

## Заключение

- История ниобата лития как материальной платформы интегральной оптики насчитывает более 70 лет
- Сверхширокополосные модуляторы на подложках объёмного ниобата лития широко используются в приложениях, требующих низкий уровень шумов, высокую оптическую мощность и высокий динамический диапазон
- Гибридные подложки тонкопленочного ниобата лития выводят данную материальную платформу на новый уровень и открывают новые горизонты практических применений
- Достигнутая на TFLN полоса частот электрооптической модуляции более 100 ГГц превосходит результаты, достигнутые на других материальных платформах интегральной оптики
- Как и для других волноводов с высокой числовой апертурой, актуальными, требующими решения, являются проблемы внутренних потерь и эффективного ввода/вывода оптического излучения (согласования с волоконно-оптическим трактом) и масштабирования
- ФТИ им. А.Ф. Иоффе начал разработки в области интегральной оптики на базе TFLN. Продемонстрирован фазовый модулятор с эффективностью модуляции  $V_{\pi}L = 4,02 \text{ В} \cdot \text{см}$  и полосой частот свыше 30 ГГц

**Спасибо за внимание!**