

Интегральная фотоника на подложках ниобата лития и новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов

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

ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен обзор результатов, полученных в лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области интегральной фотоники на подложках ниобата лития. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития интегральной фотоники на основе ниобата лития, в частности применение в квантовых информационных технологиях и увеличение степени интеграции при использовании гибридных тонкопленочных подложек.

Ключевые слова: Интегральная Оптика, Ниобат Лития, Управление Светом.

Цитирование: **Ильичев, И. В.** Интегральная фотоника на подложках ниобата лития и новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов / И. В. Ильичев, П. М. Агрузов, А. А. Усикова, М. В. Парфенов, А. В. Тронеv, А. В. Варламов, А. В. Шамрай // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 14–17.

История интегральной фотоники на ниобате лития берет свое начало с середины прошлого века. Несмотря на то, что с момента появления первых интегрально-оптических модуляторов на ниобате лития прошло уже более 50 лет, данная материальная платформа все еще находит свою нишу для практических применений. Ниобат лития (LiNbO_3) по-прежнему является одним из базовых материалов для изготовления интегральных электрооптических модуляторов [1], прежде всего для аналоговых применений в системах радиофотоники и обработки сигналов волоконно-оптических датчиков, где высокая линейность, низкий уровень вносимых шумов и возможность работы с уровнем оптической мощности в несколько сот милливатт являются главными преимуществами по сравнению с полупроводниковыми модуляторами на основе материальных платформ Al_2O_3 и кремния. Помимо электрооптического эффекта ниобат лития обладает целым набором других эффектов: пьезоэлектрическим и акустооптическим, пироэлектрическим, нелинейнооптическим эффектом второго порядка, фоторефрактивным эффектом, позволяющих создавать на подложках ниобата лития сложные интегрально-оптические устройства с широким набором функций.

В докладе представлен обзор результатов, полученных в лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе в области интегральной фотоники на подложках ниобата лития. Изначально лаборатория занималась оптическими системами обработки информации, и ниобат лития рассматривался как один из базовых фоторефрактивных материалов для реализации мультиплексирования объемных голограмм в системах голографической памяти. Работы в области интегральной оптики на подложках ниобата

лития начались в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в 2000 году и были связаны с разработкой перестраиваемого голографического фильтра [2]. За прошедшее время был получен целый ряд оригинальных научных результатов, практически реализованных в виде целой линейки интегрально оптических модуляторов для систем телекоммуникаций, высокоточных волоконно-оптических датчиков и радиофотоники.

В лаборатории первыми в России начали разработки в области интегрально-оптических СВЧ модуляторов. Была разработана оригинальная конфигурация СВЧ электродов и волноводного интерферометра Маха-Цендера, учитывающая технологические возможности ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Все это сделало возможным изготовление СВЧ модуляторов с использованием относительно простого оборудования ФТИ им. А.Ф. Иоффе, без значительных капиталовложений. Достигнутые параметры модуляторов полностью соответствует требованиям современных систем телекоммуникаций (Рис. 1). Чипы модуляторов разработки ФТИ им. А.Ф. Иоффе используются компанией ООО «СМАРТС-Кванттелеком», отечественным разработчиком квантовых систем распределения ключей.

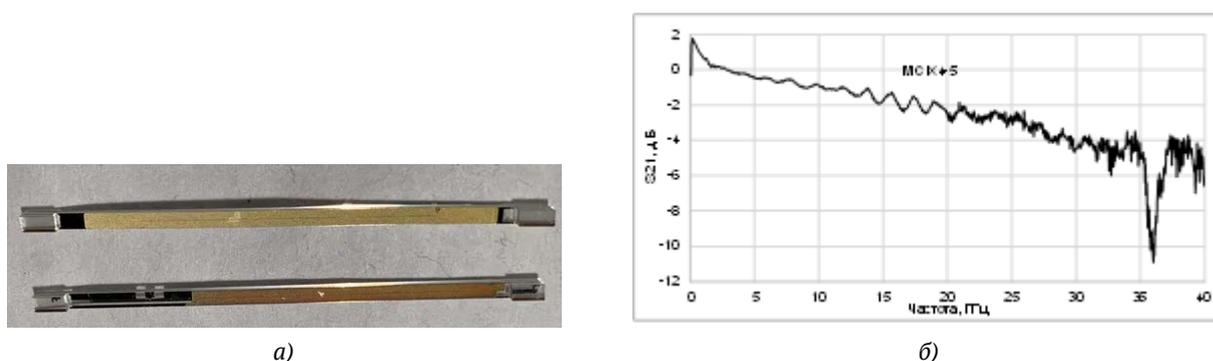


Рис. 1. (а) Чипы СВЧ модуляторов. (б) Частотная характеристика электрооптической модуляции.

Использование интегральной оптики на ниобате лития позволяет решить целый ряд задач в области квантовых систем вычислений и телекоммуникаций. С использованием управляемого интерферометра Маха-Цендера с двойным выходом был продемонстрирован квантовый источник энтропии [3] – аналоговая часть генератора истинных случайных чисел. Полученные результаты являются лучшими в мире для систем, основанных на гомодинном детектирование нулевых колебаний вакуума. Превышение квантового шума над классическим составляет более 12 дБ в полосе частот до 4 ГГц. Столь высокие параметры были получены благодаря точной балансировке интерферометра, с использованием оригинальной зондовой технологии локальной подстройки характеристик интегрально-оптических схем на подложках ниобата лития [4, 5], позволяющей улучшать характеристики уже изготовленных интегрально-оптических чипов.

Другим примером использования интегральной оптики на ниобате лития для решения квантовых задач является разработанная гибридная волноводная структура, повышающая эффективность сверхпроводящего детектора одиночных фотонов [6]. Эффективность

поглощения была повышена на 4 порядка за счет реализации эффективного модового преобразования (Рис. 2) и повышения взаимодействия оптического излучения со сверхпроводящей наноструктурой.

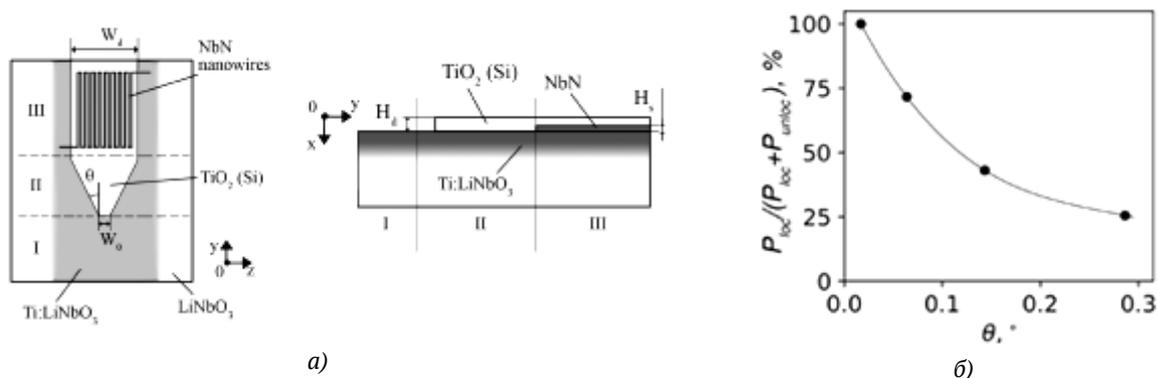


Рис. 2. (а) Сверхпроводящий детектор одиночных фотонов с гибридным преобразователем мод. (б) Зависимость эффективности преобразования от угла тэйпера.

Дальнейшее развитие интегральной фотоники на ниобате лития связано с недавно появившейся технологией тонкопленочного ниобата лития, которая помимо значительного улучшения ключевых характеристик (расширения частотной полосы свыше 100 ГГц и снижения управляющего напряжения ниже 1.5 В), открывает возможности гибридной интеграции с полупроводниковой оптоэлектроникой [7]. Данное направление также активно развивается в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Использование данной технологии позволило повысить эффективность электрооптической модуляции по сравнению со стандартными коммерчески доступными устройствами более чем в 5 раз. Причем для изготовления устройств с малой плотностью интеграции, продемонстрирована возможность использования стандартной контактной фотолитографии. Основной проблемой данного направления, в настоящее время являются относительно высокие оптические потери, по сравнению с коммерчески доступными интегрально-оптическими устройствами на подложках объемного ниобата лития.

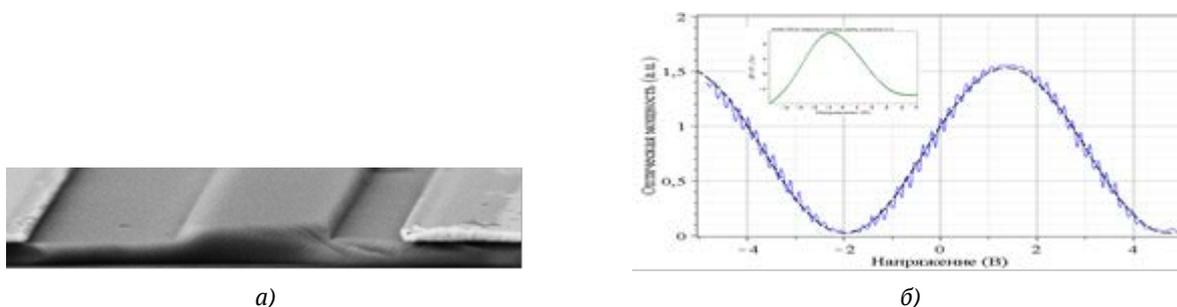


Рис. 3. (а) Фазовый модулятор на основе тонкопленочного ниобата лития. (б) Электрооптическая передаточная характеристика, демонстрирующая эффективное электрооптическое управление.

В заключении можно сказать, что интегральная оптика на ниобате лития все еще сохраняет высокий потенциал и привлекательность в целом ряде новых практических применений. Одни из наиболее ярких и бурно развивающихся направлений является квантовая фотоника, использующая новые принципы генерации, передачи и обработки оптических сигналов.

Благодарность

Результаты в области интегрально-оптических модуляторов на тонкопленочном ниобате лития были получены при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-19-00511.

Список источников

- [1] **Петров, В.М. и др.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН — 2021. — Том 191. — С. 760–780.
- [2] **Шамрай А.В. и др.** Новый метод управления формой спектральной характеристики Брэгговских решеток в электрооптических материалах // Квантовая электроника — 2005. — Том 35. — С. 734–740.
- [3] **Vashukevich, E.A. et al.** Broadband Chip-Based Source of Quantum Noise with Electrically Controllable Beam Splitter // Phys. Rev. Appl. — 2022. — Vol 17. — № 6. — ArtNo: #064039.
- [4] **Parfenov, M.V., et al.** Precise correction of integrated optical power splitters based on lithium niobate substrates by photorefractive effect local excitation // Appl. Phys. B- Lasers Opt. — 2020. — Vol 126. — ArtNo: #93.
- [5] **Tronev A.V., et al.** Local laser oxidation of titanium film for the post-fabrication trimming of photonic integrated circuits // Opt. Mater. Express. — 2022. — Vol 12. — P. 4072 – 4087.
- [6] **Parfenov M., et al.** // IEEE Photonics Journal. — 2021. — Vol 13. — № 6. — P. 1 – 7.
- [7] **Jia, Y., et al.** Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives // Appl. Phys. Rev. — 2021. — Vol 8. — ArtNo: #011307.

Integrated photonics on lithium niobate substrates and new principles of generation, transmission and processing of optical signals

*I. V. Ilichev, P. M. Agruzov, A. A. Usikova, M. V. Parfenov, A. V. Tronev, A. V. Varlamov,
A. V. Shamrai*

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

The report presents an overview of the results obtained in the Laboratory of Quantum Electronics of the Ioffe Institute in the field of integrated photonics on lithium niobate substrates. The prospects for the further development of integrated photonics based on lithium niobate are discussed, in particular, their application in quantum information technologies and an increase in the degree of integration when using hybrid thin-film substrates.

Keywords: Integrated Photonics, Lithium Niobate, Light Control.