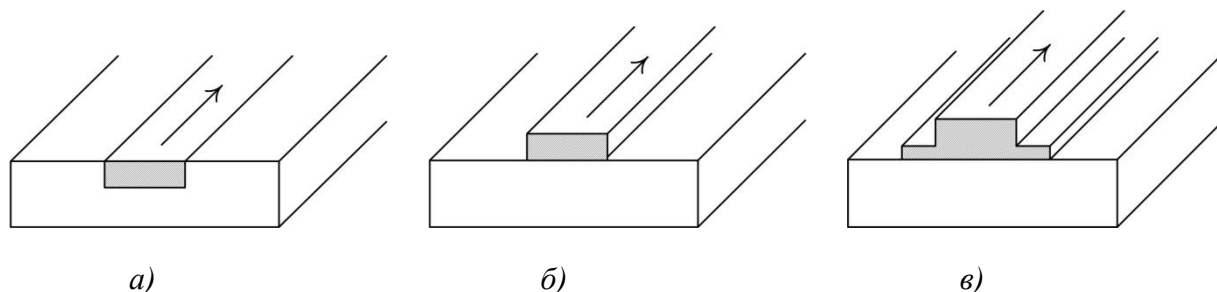


# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРИПОДНЯТОМ И ГРЕБЕНЧАТОМ ВОЛНОВОДАХ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ $\text{LiNbO}_3$

Д. Г. Гилев, У. О. Салгаева, А. Б. Волынцев

Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
614990, Пермь, Букирева, 15

Главным достоинством интегрально-оптических (ИО) устройств на подложке из ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) является их быстродействие. Основными элементами таких устройств являются оптические каналные волноводы, которые по типу профиля подразделяются на внедренные и приподнятые. Частным случаем приподнятых волноводов являются гребенчатые, отличающиеся наличием широкого пьедестала (рис. 1) [1].



**Рис. 1.** Оптические каналные волноводы:  
а) внедренный, б) приподнятый, в) гребенчатый

Приподнятые и гребенчатые волноводы, по сравнению с внедренными, обладают малыми оптическими потерями, в частности на изгибах, что позволяет повысить степень интеграции элементов на одной подложке и уменьшить размеры ИО устройств. Поэтому оптические схемы, включающие в себя такие волноводы на подложке из ниобата лития, являются наиболее перспективными для создания элементной базы для волоконно-оптических линий связи, датчиков и других ИО устройств.

Для эффективной работы таких устройств необходимо следить за оптическими потерями в волноводе, искать его оптимальные конфигурации. Поэтому целью работы является численное исследование характеристик гребенчатого и приподнятого волноводов на подложке из  $\text{LiNbO}_3$  для дальнейшего использования созданных моделей в ходе разработки ИО схем.

Приподнятый волновод на подложке из  $\text{LiNbO}_3$  может быть изготовлен конфигурацией методов ионного обмена ( $\text{Ti}$ -диффузии, протонного обмена, ионной имплантации), также использующихся для создания внедренных волноводов [2], и химического травления (в плазмах и кислотах) (рис. 1б)).

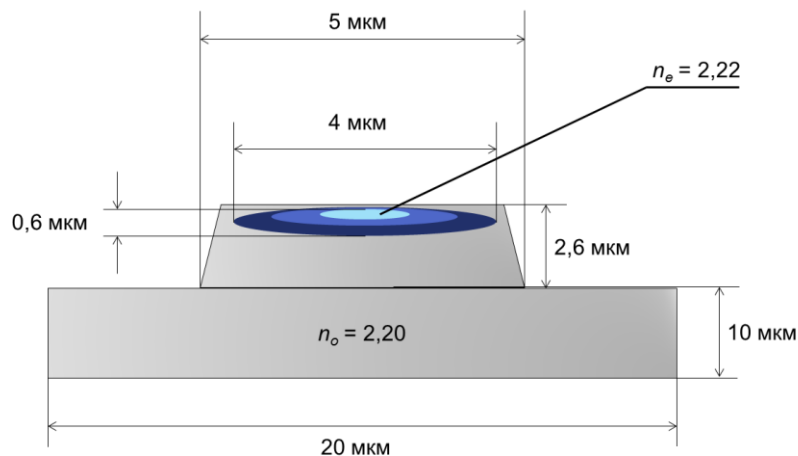
Для изготовления гребенчатого волновода требуется тонкая кристаллическая пленка из  $\text{LiNbO}_3$ , которая может быть прикреплена к некоторому кристаллу-носителю или с помощью бондинга, или при использовании промежуточного полимера. Толщина такой пленки обычно составляет 300 –

700 нм. Размер устройств, выполненных на тонкопленочном ниобате лития, может быть уменьшен в десятки раз, причем потребление мощности будет ниже, производительность стабильнее.

Для изготовления приподнятых и гребенчатых волноводов, из-за возможности быстро и без дополнительных технологических операций с помощью методов жидкостного химического травления создать требуемый профиль волновода, часто используется  $-Z$ -срез  $\text{LiNbO}_3$ . При использовании других кристаллографических ориентаций ( $\pm X$ -,  $+Z$ -срезов) для создания профиля требуется либо использование сложного оборудования (плазмохимическое травление), либо проведение дополнительных технологических операций (ионный обмен).

Используя САПР для моделирования фотонных интегральных схем, были созданы модели приподнятого и гребенчатого волноводов на подложке из  $\text{LiNbO}_3$ .

В модели приподнятого волновода было учтено градиентное изменение показателя преломления (ПП), так как для его создания используются методы ионного обмена. Градиентный профиль изменения ПП представлен в виде вложенных друг в друга эллипсов, где центральный эллипс представляет собой волноводный слой с максимально измененным показателем преломления. Такое приближение часто используется в литературе [2]. Используемая модель для численного моделирования приподнятого волновода приведена на рис. 2.

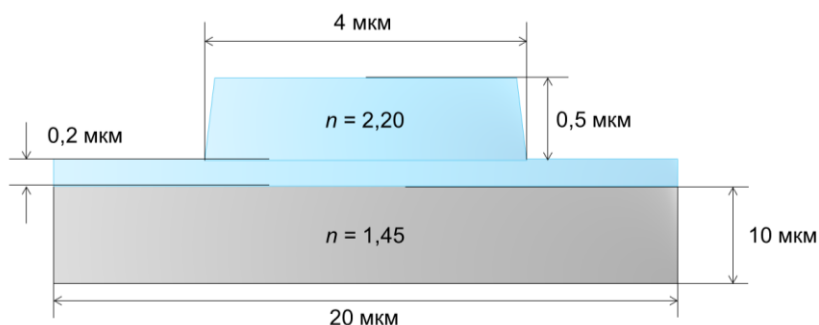


**Рис. 2.** Модель гребенчатого волновода с градиентным профилем ПП

Для данной модели (рис. 2) были получены следующие результаты: потери на прямом участке волновода для ТЕ-моды составляют 1.0 дБ/см, для ТМ-моды – 1.8 дБ/см. Для сравнения, потери во внедренных волноводах, где изменение показателя преломления достигается так же с помощью методов ионного обмена составляет в среднем 2.0 дБ/см для ТЕ-моды на прямом участке волновода.

При создании модели гребенчатого волновода на тонкопленочном ниобате лития (рис. 3) в качестве характерных размеров были выбраны

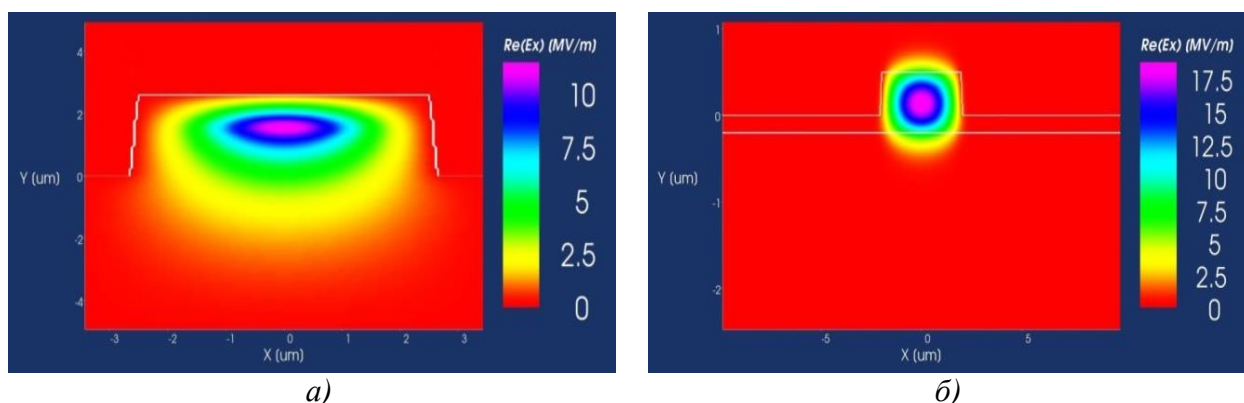
размеры, использованные авторами статьи [3], использовавшими данный тип волновода для создания кольцевых микрорезонаторов.



**Рис. 3.** Модель гребенчатого волновода на основе тонкопленочного  $\text{LiNbO}_3$

Для прямого волновода из тонкопленочного ниобата лития получены потери: для ТЕ-моды 0,36 дБ/см, для ТМ-моды 0,25 дБ/см.

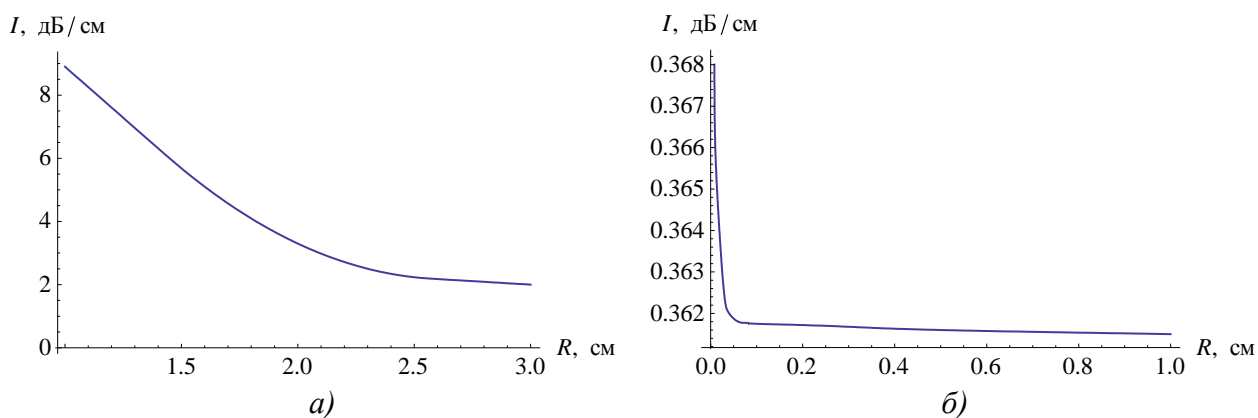
Для обоих типов волноводов – приподнятого и гребенчатого – были получены профили распределения мощности излучения на прямых участках волноводов (рис. 4а и 4б).



**Рис. 4.** Профиль распределения мощности оптического излучения ( $\text{Re}(E_x)$ ):  
а) в приподнятом волноводе; б) в гребенчатом волноводе

Из приведенных на рис. 4 профилей распределения мощности оптического излучения наглядно видно, что в гребенчатом волноводе на основе тонкопленочного  $\text{LiNbO}_3$  ограничение оптического излучения выше, что и подтверждается меньшими оптическими потерями по сравнению с приподнятым волноводом.

Также для обоих типов волноводов были исследованы потери ТЕ-моды оптического излучения на изгибах с радиусами 0,1 до 3000 мкм. Графики зависимости оптических потерь для двух типов волноводов представлены на Рисунке 5 а) и б). Потери для ТМ-моды оптического излучения не сравнивались.



**Рис. 5.** Зависимость оптических потерь TE-моды излучения от радиусов изгиба волновода

На основе графиков, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, что для целей повышения плотности интеграции оптических устройств на одной подложке, наилучшим вариантом является гребенчатый волновод на основе тонкопленочного ниобата лития.

В том случае, когда оптические потери на изгибах не являются критическим требованием ИО устройств, для изготовления оптической схемы могут быть использованы приподнятые волноводы.

Полученные данные, после дополнительной проверки и уточнения, лягут в основу моделей фотонных интегральных схем, которые в будущем могут заменить традиционные электронные интегральные схемы.

Данная работа выполнена в рамках проекта 02.G25.31.0113 «Разработка базовой технологии и создание производства фотонных интегральных схем для приборов, систем и комплексов оптоэлектронного навигационного приборостроения», реализуемого ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» совместно с ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

### Список литературы

1. Сидоров А. И., Никоноров Н. В. Материалы и технологии интегральной оптики. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 107 с.
2. Шевцов Д.И. Структурные и оптические свойства метастабильных фаз в протонообменных волноводных слоях на монокристалле ниобата лития. Диссертационная работа. Пермь: ПГУ, 2005. 167 с.
3. Guarino A. Electro-optically tunable microring resonators in lithium niobate // Nature photonics. 2007. Vol. 1. P. 407–410.