

УДК 535.93

## ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФОТОННЫХ СХЕМ В СТЕКЛЕ К8 ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1550 НМ

© М. М. Векшин, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко

*Кубанский государственный университет,  
350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149  
E-mail: vek-shin@mail.ru*

Проведены расчёты на основе физико-математической модели ионного обмена и электростимулированной миграции ионов в стёклах с использованием методов распространяющегося пучка и модового анализа с последующим формированием фотонных интегральных схем в подложках из отечественного оптического стекла К8, которые функционируют на длине волны 1550 нм. Изготовлены и исследованы основные пассивные волноводные компоненты, в том числе одномодовые делители оптических сигналов, элементы направленной связи, преобразователи поляризации и т. п. Созданы многоканальные волноводные разветвители оптических пучков и матрицы (512 × 512 шт) из длиннофокусных плосковыпуклых микролинз для датчиков волнового фронта Шэка — Гартмана методом электростимулированной миграции ионов в стеклянные подложки.

*Ключевые слова:* интегральная оптика, ионный обмен в стекле.

DOI: 10.15372/AUT20220303

**Введение.** Развитие интегральной оптики имеет важное значение, обусловленное её использованием в современных и перспективных волоконно-оптических системах связи и в научных исследованиях в области фотонной биосенсорики, квантовой криптографии, оптической вычислительной техники и т. д. Технология многоэтапного ионного обмена в стёклах позволяет создавать волноводные схемы различного функционального назначения [1–7].

Цель данного исследования состоит в разработке интегрально-оптических схем в подложках из отечественного оптического стекла К8, функционирующих на длине волны 1550 нм. Проведено физико-математическое моделирование технологических процессов формирования одномодовых интегрально-оптических схем в боросиликатном стекле К8 методом ионного обмена и/или электростимулированной миграции ионов. Модель использована совместно с методом распространяющегося пучка и другими средствами анализа оптических схем для разработки и изготовления волноводных структур, которые реализуют набор пассивных оптических элементов с функциями обработки оптических сигналов на длине волны 1550 нм, а также создания элементов и структур микрооптики (планарных матриц микролинз) для датчиков волнового фронта Шэка — Гартмана.

**Физико-математическая модель и технологические приёмы.** Формирование волноводных структур в подложках из стекла состоит из последовательности физико-химических процессов (этапов), оптимизированных по времени и температуре: простого или электростимулированного ионного обмена в расплавах нитратов металлов, электростимулированного заглубления волновода, термического отжига волновода. В зависимости от типа создаваемой волноводной схемы последний этап отжига, а иногда и этап заглубления не применяются. Использование различных внедряемых ионов ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) даёт возможность формировать модельные градиентные профили показателя преломления при термическом ионном обмене в интервале температур 320–400 °С. Также выполняется

частичное заглубление волноводного канала через маску, закрывающую часть поверхности волновода [5].

Любой этап технологического процесса формирования интегрально-оптических элементов в стекле описывается уравнением диффузии. Для обмена ионов серебра и натрия и в случае двух пространственных измерений это уравнение имеет вид [5]

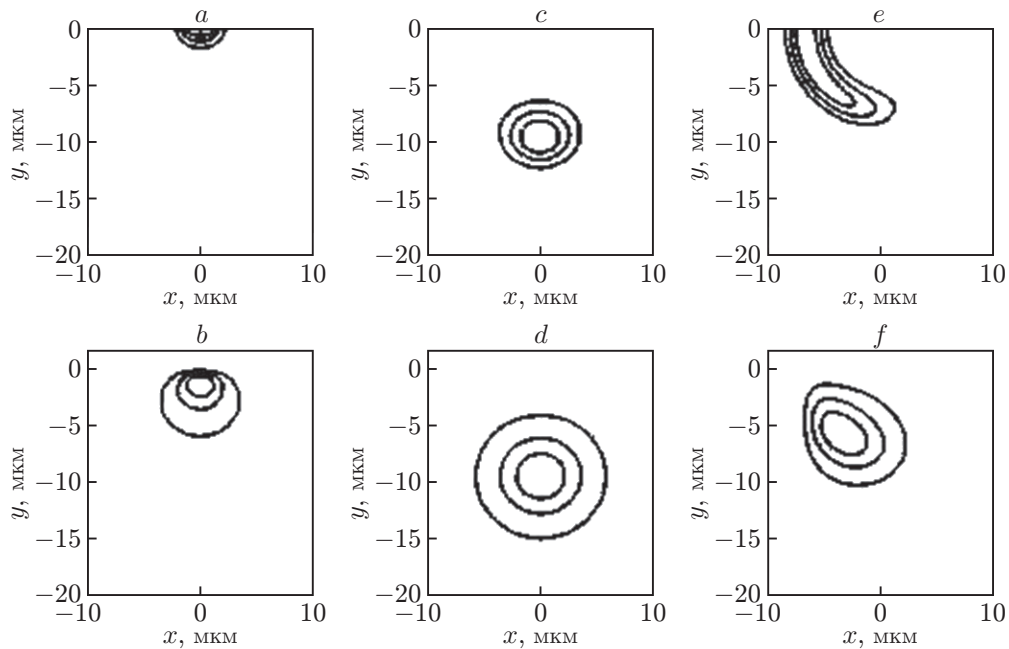
$$\frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial t} = \frac{D_{\text{Ag}}}{1 - (1 - M)C_{\text{Ag}}} \left[ \frac{\partial^2 C_{\text{Ag}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_{\text{Ag}}}{\partial y^2} + \frac{1 - M}{1 - (1 - M)C_{\text{Ag}}} \left( \left( \frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial y} \right)^2 \right) - \frac{q}{fkT} \left( E_x \frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial x} + E_y \frac{\partial C_{\text{Ag}}}{\partial y} \right) \right], \quad (1)$$

где  $C_{\text{Ag}}$  — относительная концентрация внедряемого иона серебра:  $C_{\text{Ag}} = c_{\text{Ag}}/c_0$ ,  $c_{\text{Ag}}$  — концентрация ионов серебра,  $c_0$  — начальная концентрация ионов натрия в стекле;  $D_{\text{Ag}}$  — собственный коэффициент диффузии ионов серебра;  $M$  — отношение собственных коэффициентов диффузии ионов серебра и натрия:  $M = D_{\text{Ag}}/D_{\text{Na}}$ ;  $q, f, k, T$  — заряд электрона, коэффициент корреляции, постоянная Больцмана и температура по Кельвину соответственно;  $t$  — время диффузионного процесса;  $E_x$  и  $E_y$  — декартовы компоненты напряжённости стимулирующего электростатического поля в стеклянной подложке. Решение уравнения диффузии (1) с соответствующими граничными условиями [4] — распределение концентрации внедрённых ионов серебра ( $c_{\text{Ag}}$ ) определяет профиль показателя преломления по сечению формируемых волноводов.

Для учёта влияния стимулирующего электрического поля, прикладываемого для формирования или для заглубления волновода (волноводной схемы), уравнение диффузии (1) необходимо решать совместно с уравнением электростатики. Это уравнение описывает распределение электрического потенциала в стеклянной подложке, и в нём учитывается неоднородность ионной проводимости стекла в области внедрения ионов серебра.

Использование уравнения диффузии для моделирования различных оптических микроструктур возможно только при известных значениях  $D_{\text{Ag}}$ ,  $M$  и приращения показателя преломления  $\Delta n$  на поверхности подложки. Проведён расчёт и восстановление параметров  $\Delta n$ ,  $D_{\text{Ag}}$ ,  $M$  по измеренным значениям эффективных показателей преломления планарных волноводов, полученных в расплаве  $\text{AgNO}_3:\text{NaNO}_3$  в соотношении молярных долей 1 : 10. Используемая для этого модифицированная методика была разработана на основе способа многомерной оптимизации Нелдера — Мида. Для вышеуказанного расплава значения искомых параметров таковы:  $D_{\text{Ag}} = 0,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\Delta n = 0,057$ ,  $M = 0,03$ .

Проведено прямое численное решение уравнения диффузии (1) путём его конечно-разностной временной дискретизации по схеме Кранка — Николсона с его трансформацией к системе нелинейных уравнений. Указанный способ позволил получить решение уравнения, которое было стабильно в широком диапазоне величины  $M$ : от 0,01 до 1. Расчёты проводились для подбора технологических параметров процесса формирования волноводов и волноводных схем, функционирующих в одномодовом режиме на длине волны 1550 нм и имеющих эффективные размеры фундаментальной оптической моды, близкие к размеру моды одномодовых волоконных световодов, которые применяются в телекоммуникационных системах. По результатам расчёта двумерного распределения концентрации определялись оптические параметры мод ионообменных волноводов, в том числе распределение электрического поля в поперечном сечении волновода. Результаты расчётов для ТЕ-мод приведены на рис. 1. Расчётные эффективные размеры электрического поля полностью заглублённого канального волновода равны  $10,6 \times 9,9$  мкм.



*Рис. 1.* Расчётные распределения концентрации ионов серебра в стеклянной подложке при различных технологических этапах и соответствующие распределения полей мод: типовое распределение концентрации ионов серебра в волноводе, полученное путём термического ионного обмена (*a*), соответствующее распределение электрического поля фундаментальной ТЕ-моды (*b*); характерное распределение концентрации ионов серебра в волноводе в результате электростимулированного заглабления ионообменного волновода (*c*), соответствующее распределение электрического поля ТЕ-моды одномодового волновода (*d*); характерное распределение концентрации ионов серебра в волноводе в результате селективного электростимулированного заглабления ионообменного волновода через маску, закрывающую левую половину поверхности подложки над волноводом (*e*), соответствующее распределение электрического поля ТЕ-моды одномодового волновода (*f*)

### Проектирование, создание и исследование волноводов и волноводных схем.

Формирование топологии волноводных структур проводилось с применением безмасковой фотолитографической установки  $\mu\text{PG101}$  производства фирмы Heidelberg (Германия). Для формирования  $\text{Ag}^+$ -волноводов в стеклянных подложках типа К8 использовался разбавленный расплав  $\text{AgNO}_3\text{—NaNO}_3$  в соотношении 1 : 200 моль для снижения вероятности образования коллоидных частиц серебра на поверхности стекла и под краями маски, из-за которых увеличивается оптическое затухание. По этой же причине алюминиевая маска подвергалась оксидированию. Симметризации профиля волновода способствовал выбор малой ширины щели в маскирующем слое 2 мкм.

Исследование параметров поля мод сформированных оптических волноводов на длине волны 1550 нм проводилось на специализированной виброустойчивой установке с применением ПЗС-камеры Spiricon SP503U-1550. На рис. 2, *a* приведены контуры интенсивности поля в плоскости выходного торца заглабленного  $\text{Ag}^+$ -волновода. Измеренный размер поля моды одномодового оптического волновода составил  $11,4 \times 10,4$  мкм. Для сопоставления на рис. 2, *b* показано поле моды волоконного световода типа SMF-28 с эффективным диаметром моды 10,3 мкм. На рис. 2, *c* представлены измеренные контуры интенсивности

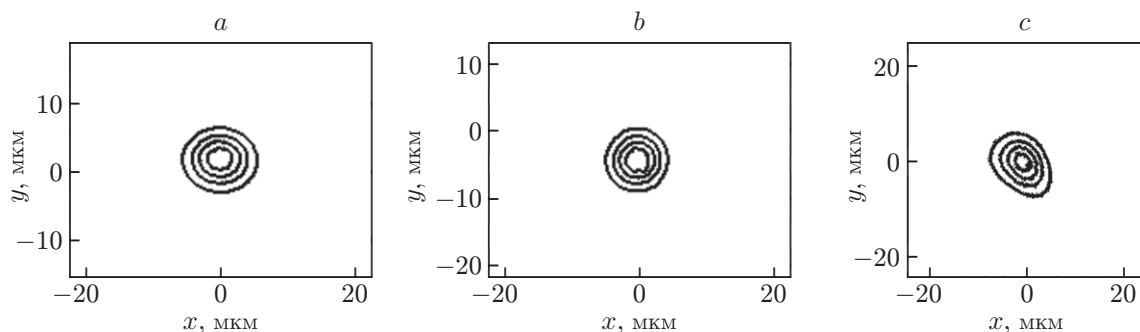


Рис. 2. Результаты измерений полей мод изготовленных волноводов, сопоставленные с полем моды стандартного волоконного световода: измеренное распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце заглублённого  $\text{Ag}^+$ -волновода в стекле (a); распределение излучения на торце волоконного световода SMF-28 (b); распределение интенсивности оптического излучения на выходном торце селективно заглублённого  $\text{Ag}^+$ -волновода в стеклянной подложке (c)

сти оптического излучения на выходном торце селективно заглублённого  $\text{Ag}^+$ -волновода с помощью маски, занимающей левую половину поверхности стеклянной подложки. Как видно на данном рисунке, поле моды имеет асимметричную форму. Оптические потери в волноводе измерены методом половинного деления образца, они составили величину менее 0,5 дБ/см на длине волны 1550 нм. Потери в волноводах обусловлены главным образом собственным поглощением оптического излучения частицами коллоидного серебра.

Для разработки волноводных структур (рис. 3, a) применён трёхмерный метод распространяющегося пучка [8], совместно с решением уравнения диффузии (1). При построении древовидных Y-разветвителей учитывались требования минимизации радиационных потерь и необходимость подавления эффекта интерференции излучательных мод, порождаемых в S-изгибах, и направленной моды волноводной структуры [9]. При расчётах направленных ответвителей учитывалось, что направленная связь волн существует и в области сближения волноводных S-изгибов.

Созданы топологии всех основных оптических волноводных элементов (рис. 3, a), и по подобранным для формирования одномодового режима технологическим параметрам изготовлены: прямолинейные (1) и S-изогнутые волноводные каналы различных функциональных форм (2), многоканальные Y-разветвители (3) с эквивалентным углом разветвления до  $3,5^\circ$ , разветвители на основе эффекта межмодовой интерференции (MMI, multi mode interference) (4), звездообразные разветвители (5), интерферометры Маха — Цендера на основе разветвителей сигналов (6) и на основе направленных ответвителей (8), направленные ответвители (7) с варьируемой длиной связи в диапазоне 1–3 мкм и соответственно с заданным коэффициентом деления оптической мощности, интегрально-оптические ТЕ- и ТМ-поляризаторы (9). Разработан новый технологический метод формирования рупорообразных электростимулированных волноводов [7], основанный на использовании катода игольчатой формы. Рупорообразные волноводы применимы в том числе для наиболее эффективного сопряжения волоконных световодов и интегрально-оптических схем. Помимо стандартных поляризаторов ТЕ-типа с металлическим покровным слоем были созданы и исследованы предложенные в [10] интегрально-оптические поляризаторы нового типа с высокопреломляющим покровным слоем на основе  $\text{As}_2\text{S}_3$ .

Изготовленные направленные ответвители имели деление 3 дБ оптической мощности при длине связи 2200 мкм (расстояние между волноводными каналами 15 мкм,

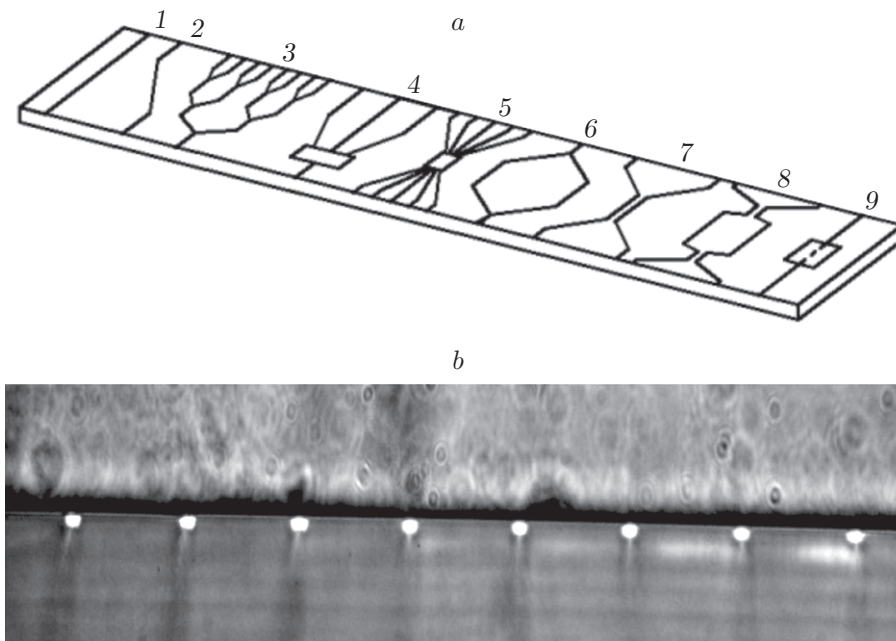


Рис. 3. Базовые элементы схем планарной фотоники: схематический вид интегрально-оптических элементов (обозначены цифрами) в стеклянной подложке (а), фотография выходного торца древовидного разветвителя (3)  $1 \times 8$  (b)

$\lambda = 1550$  нм). На рис. 3, b показана фотография выходных торцов изготовленного древовидного интегрально-оптического разветвителя  $1 \times 8$  при введённом в него излучении. Отклонение измеренных коэффициентов разветвления Y-разветвителей  $1 \times 8$  от величины 12,5 % не превышало 1,5 %. MMI-разветвители  $1 \times 3$  имели отклонение коэффициентов разветвления от величины 33,3 % не более 2 %. TE- и TM-поляризаторы имели коэффициент экстинкции 30 дБ при вносимых потерях в пропускаемую моду менее 1 дБ.

**Новые оптические функциональные элементы.** Предложено и создано [11] волноводное устройство для преобразования плоскости поляризации оптического излучения. Схема преобразователя показана на рис. 4, a. Преобразователь поляризации состоит из ионообменного  $K^+$ -волновода в стекле, покрытого диэлектрической плёнкой с высоким показателем преломления, ориентированной клиновидным образом вдоль продольной оси волновода.

Принцип работы преобразователя поляризаций основан на особенностях мод волноводов с указанным профилем показателя преломления. Установлено, что вторая и третья моды волновода при изменении толщины плёнки изменяют своё состояние поляризации, мода  $TM_0$  трансформируется в моду  $TE_1$ , а мода  $TE_1$  становится модой  $TM_0$ . Подобные особенности мод ранее были установлены у высококонтрастных полосковых волноводов на основе полупроводниковых материалов [12]. Преобразователь поляризации использует принцип эволюции мод [13] и функционирует следующим образом. Входное TM-поляризованное излучение возбуждает в волноводе моду  $TM_0$ . При распространении моды за счёт адиабатического увеличения толщины плёнки её поляризация изменяется и на выходе волновода существует мода  $TE_1$ . Расчётные поляризации на входе и выходе преобразователя (ориентация вектора напряжённости магнитного поля) показаны на рис. 4, b, c.

В ходе экспериментальных исследований (использовалась плёнка  $As_2S_3$  с показателем преломления 2,40) ряда образцов с плёнками, имеющими различную крутизну клина,

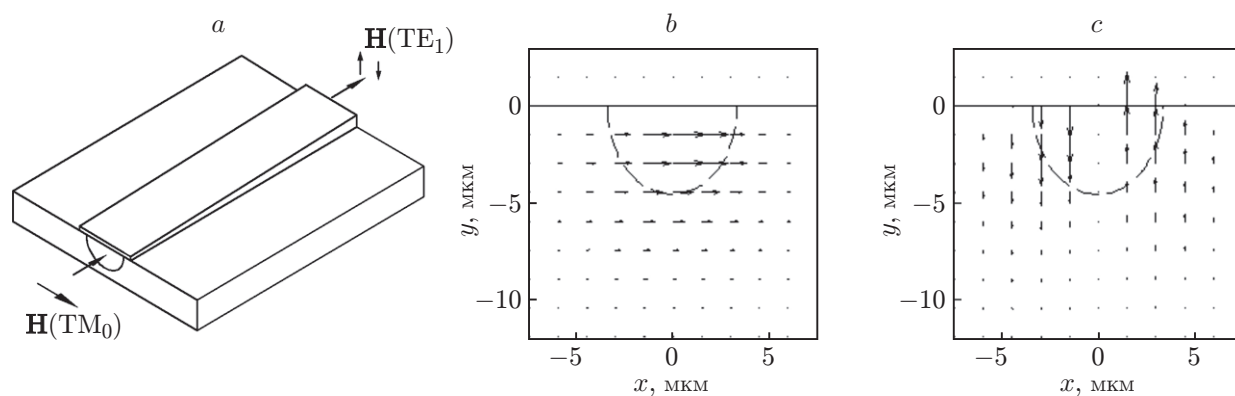


Рис. 4. Преобразователь поляризации оптического излучения  $TM_0-TE_1$ : схематический вид волноводного преобразователя поляризации (a); картины поляризации мод  $TM_0$  и  $TE_1$  на входе и выходе преобразователя соответственно (b), (c)

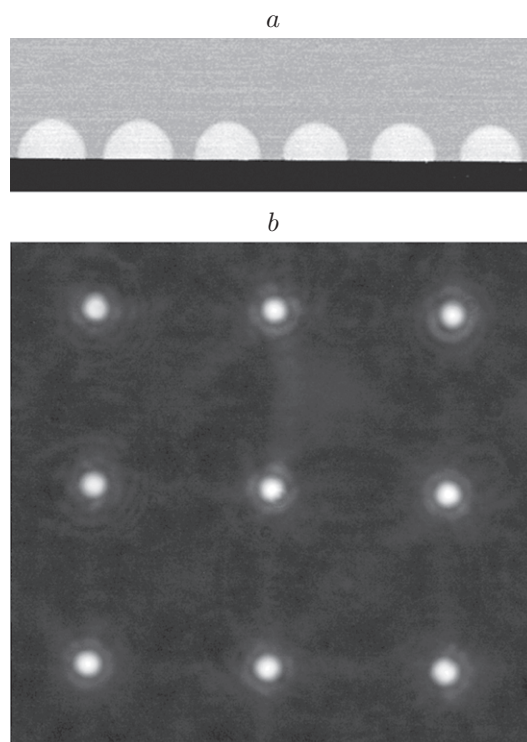


Рис. 5. Матрицы микролинз, полученные методом электростимулированной миграции ионов серебра в стекле: изображение вертикального среза стеклянной подложки с фрагментом матрицы микролинз (a); распределение оптического излучения в фокальной плоскости микролинз (b)

наблюдался предсказанный эффект поворота плоскости поляризации. Измеренная эффективность преобразования поляризаций ТМ—ТЕ составляла 95 % [11].

Возможности описанных технологических приёмов таковы, что они подходят для создания не только одномодовых, но и многомодовых волноводных схем, матриц микролинз [3, 14]. Электростимулированной миграцией ионов серебра изготовлены матрицы размером  $512 \times 512$  элементов плосковыпуклых микролинз в подложках стекла К8 с применением специально разработанного способа их формирования [3]. Изготовленная матрица микролинз с шагом 150 мкм содержала линзы диаметром 125 мкм с фокусным расстоянием 1,5 мм, при этом измеренный диаметр фокального пятна равен 19 мкм, а число Френеля — 4,1. На рис. 5, *a* представлено изображение фрагмента матрицы микролинз, полученное с помощью растрового электронного микроскопа JSM-7500F. Распределение оптического излучения в фокальной плоскости фрагмента матрицы линз ( $3 \times 3$  элемента) приведено на рис. 5, *b*.

Изготовленные длиннофокусные линзы использовались в макете датчика волнового фронта Шэка — Гартмана [14]. Датчик состоит из матрицы микролинз, которая располагается в фокальной плоскости ПЗС-камеры [15]. Применение матрицы линз с 8-битовой ПЗС-камерой с размером пикселя 8 мкм позволило измерять искажения волнового фронта с динамическим диапазоном угла  $8^\circ$  (44 мрад) и чувствительностью 20 мкрад [14].

**Заключение.** Таким образом, разработаны, созданы и исследованы одномодовые элементы интегральной оптики в подложках из отечественного стекла К8 методами ионного обмена и электростимулированной миграции ионов с прогнозируемой топологией и волноводными характеристиками, на основе которых реализуются основные (для пассивных фотонных схем) функции обработки оптических сигналов на длине волны 1550 нм. В частности, были созданы волоконно-совместимые многоканальные разветвители, направленные ответвители, интерферометры Маха — Цендера и поляризационные устройства с размером поля моды волноводных каналов  $11,4 \times 10,4$  мкм и их погонными потерями менее 0,5 дБ/см на указанной длине волны.

Достигнутый уровень современных разработок интегрально-оптических схем сложных волноводных топологий на основе оптического стекла, которые были рассмотрены в данной работе, позволяет, во-первых, перейти к их серийному производству для использования в качестве компонентов волоконно-оптических систем передачи информации, и, во-вторых, с учётом появления новых научных направлений, в частности квантовой фотоники, астрофотоники и т. д., использовать технологию ионного обмена в стекле как базовую платформу для построения новых, перспективных функциональных узлов оптической обработки информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Righini G. C., Liñares J.** Active and quantum integrated photonic elements by ion exchange in glass // *Appl. Sci.* 2021. **11**, N 11. 5222.
2. **Никитин В. А., Яковенко Н. А.** Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике. Краснодар: КубГУ, 2013. 245 с.
3. **Пат. 2312833 РФ.** Способ изготовления интегральных микролинз /М. М. Векшин, В. А. Никитин, А. В. Никитин, Н. А. Яковенко. Оpubл. 20.12.2007, Бюл. 35.
4. **Никаноров Н. В., Петровский Г. Т.** Стёкла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // *Физика и химия стекла.* 1999. **25**, № 1. С. 21–69.
5. **Tervonen A., West B. R., Honkanen S.** Ion-exchanged glass waveguide technology: A review // *Opt. Eng.* 2011. **50**, N 7. P. 071107-1–071107-15.

6. **Broquin J.-E.** Glass integrated optics: State of the art and position toward other technologies // Proc. SPIE. 2007. **6475**. 647507.
7. **Пат. 2524460 РФ.** Способ изготовления интегрально-оптической схемы в стеклянной подложке с рупорообразным волноводом /М. М. Векшин, В. А. Никитин, Н. А. Яковенко. Опубл. 27.07.2014, Бюл. 21.
8. **Huang W. P., Xu C. L.** Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method // IEEE Journ. Quant. Electron. 1993. **29**, N 10. P. 2639–2649.
9. **Yap D., Johnson M.** Coupling between successive Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide bends and branches // Appl. Opt. 1984. **23**, N 17. P. 2991–2998.
10. **Векшин М. М., Гладкий В. П., Никитин В. А., Яковенко Н. А.** Интегрально-оптические поляризаторы на основе многослойных диэлектрических волноводов // Автометрия. 1998. № 5. С. 58–65.
11. **Векшин М. М., Яковенко Н. А.** Преобразование поляризации путём конверсии мод ТМ<sub>0</sub>—ТЕ<sub>1</sub> в ионообменном стеклянном волноводе // Автометрия. 2019. **55**, № 1. С. 51–55. DOI: 10.15372/AUT20190107.
12. **Dai D., Liu L., Gao S. et al.** Polarization management for silicon photonic integrated circuits // Laser & Photon. Rev. 2013. **7**, Iss. 3. P. 303–328.
13. **Watts M. R., Haus H. A.** Integrated mode-evolution based polarization rotators // Opt. Lett. 2005. **30**, Iss. 2. P. 138–140.
14. **Vekshin M. M., Levchenko A. S., Nikitin A. V. et al.** Glass microlens arrays for Shack — Hartmann wavefront sensors // Meas. Sci. Technol. 2010. **21**, N 5. 054010.
15. **Tyson R. K., Frazier B. W.** Principles of Adaptive Optics. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. 384 p.

*Поступила в редакцию 07.04.2022*

*После доработки 19.04.2022*

*Принята к публикации 18.05.2022*

---